

VŠB – Technická Univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Malé modulární jaderné reaktory

Small Modular Nuclear Reactors

Student:

Tomáš Tužinský

Vedoucí diplomové práce:

Prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc

Ostrava 2015

Zadání bakalářské práce

Student: **Tomáš Tužinský**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **3907R009 Provoz energetických zařízení**
Téma: **Malé modulární jaderné reaktory**
Small Modular Nuclear Reactors

Zásady pro vypracování:

Zpracujte formou rešerže koncepci malých modulárních jaderných reaktorů.
Vypracujte ideový návrh parogenerátorového článku pro malou jadernou teplárnu s tlakovodním reaktorem.
Proveďte výpočet základních rozměrů, Tepelný výkon PG : 229 MWt, primární voda: teplota 301/268 degC, tlak 12,5 MPa, sytá pára: teplota 259 degC, tlak: 4,7 MPa , napájecí voda: teplota 223 degC.

Seznam doporučené odborné literatury:

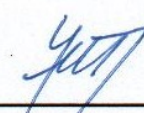
Radko Hejzlar : Stroje a zařízení jaderných elektráren. Díl 1 a 2. Vydavatelství ČVUT v Praze. 2005. ISBN 80-01-03190-X
Oldřich Mátal: Jaderné reaktory a jejich chlazení. Nakladatelství CERN VUT v Brně. 2001. ISBN 80-214-2028-6.
František Hezoučky: Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory. Vydavatelství ČVUT v Praze. 2005. ISBN 80-01-03324-4.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

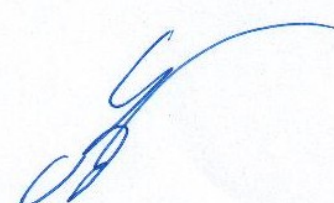
Datum zadání: 13.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015



prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry





doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě14.5.2015.....

.....Tužinský.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 14.5. 2015

Tužinský
.....
podpis

Tomáš Tužinský

Na Návrší 1823, Petřvald u Karviné, 735 41

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Tužinský, T. Malé modulární jaderné reaktory: bakalářská práce. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2015, 44 s. Bakalářská práce, vedoucí Kolat, P.

Bakalářská práce obsahuje přehled všech momentálně vyvíjených SMR, vyjma reaktorů generace IV. Uvádí do jejich koncepce a zhodnocuje jejich potenciál pro budoucnost jaderné energetiky. Dále se bakalářská práce zabývá ideovým návrhem parogenerátoru pro malou jadernou teplárnu s výkonem 229 MW_t. Proces návrhu je složen z výběru vhodného parogenerátoru a provedení tepelného výpočtu vedoucímu ke stanovení rozměrů parogenerátoru.

V práci je proveden tepelný výpočet, na jehož základě byly stanoveny rozměry parogenerátoru. Vzhledem k rozsahu práce byl hydraulický výpočet zanedbán. Práce je doplněna o model smyčky s jedním parogenerátorovým článkem.

ANNOTATION OF THESIS

Tužinský, T. Small Modular Nuclear Reactors: Bachelor Thesis. Ostrava: VŠB-Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energetics, 2015, 44 p. Thesis, head: Kolat, P.

This bachelor thesis contains summary of all SMR prototypes, except of those of the IV. generation. Introducing into the conception of SMR and evaluating their potential for the future of nuclear energetics. The bachelor thesis also aims to design a steam generator for small nuclear heating plant generating 229 MW_{th}. Designing is divided into few steps. The first is selection of suitable steam generator and as second it is realization of thermal calculation leading to specify dimensions of the steam generator.

There is thermal calculation done in this bachelor thesis and based on this calculation, dimensions of the steam generator were designed. Due to small range of this thesis, hydraulic calculation was omitted. Thesis is supplemented with model of one steam generator loop with one steam generators segment.

Obsah bakalářské práce

Seznam použitých symbolů	7
1 Úvod	10
2 Malé modulární jaderné reaktory	12
3 Charakteristika a srovnání s nyní používanými typy JR	12
4 Ekonomické zhodnocení	15
4.1 Shrnutí	16
5 Reaktorové systémy	17
5.1 Lehkou vodou moderované SMR	17
5.2 Těžkou vodou moderované SMR	33
5.3 Reaktory IV. Generace	35
6 Návrh parogenerátorového článku	36
6.1 Charakteristika parogenerátoru	36
6.2 Tepelný výpočet	37
7 Závěr	54
8 Seznam použité literatury	55

Seznam použitých symbolů

D_e	ekvivalentní průměr pláště	[mm]
D_{pl}	vnější průměr pláště	[mm]
D_{tr}	vnější průměr teplosměnných trubek	[mm]
L_d	délka teplosměnné plochy dohřívacího úseku	[mm]
L_v	délka teplosměnné plochy výparného úseku	[mm]
Nu	Nuseltovo číslo	[-]
Pr	Prandtlovo číslo	[-]
Q_c	celkový tepelný výkon	[MW]
$Q_{\dot{c}}$	tepelný výkon článku	[MW]
Q_d	tepelný výkon dohřívací části	[MW]
Q_v	tepelný výkon výparné části	[MW]
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
S_I	průtočná plocha na straně primárního média	[mm ²]
S_{II}	průtočná plocha na straně sekundárního média	[mm ²]
c	cirkulační číslo	[-]
d_{hII}	hydraulický průměr mezitrubkového prostoru	[mm]
d_{pl}	vnitřní průměr pláště	[mm]
d_{tr}	vnitřní průměr teplosměnných trubek	[mm]
i_I	entalpie primární vody	[kJ·kg ⁻¹]
i_{ID}	entalpie primární vody na vstupu do dohřívacího úseku	[kJ·kg ⁻¹]
i_{nv}	entalpie napájecí vody	[kJ·kg ⁻¹]
i_p	entalpie syté páry	[kJ·kg ⁻¹]
i_{pk}	entalpie podchlazené kapaliny	[kJ·kg ⁻¹]
i_{sv}	entalpie syté vody	[kJ·kg ⁻¹]
Δi_d	přírůstek entalpie v dohřívacím úseku	[kJ·kg ⁻¹]
k_d	součinitel prostupu tepla v dohřívacím úseku	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
k_v	součinitel prostupu tepla ve výparném úseku	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
l_{ct}	teoretická potřebná délka teplosměnných trubek	[m]
l_d	délka dohřívací části trubek	[m]
l_{tr}	skutečná délka teplosměnných trubek	[m]
l_v	délka výparné části teplosměnných trubek	[m]
m_I	hmotnostní průtok primárního média článkem	[kg·s ⁻¹]
m_{II}	hmotnostní průtok sekundárního média článkem	[kg·s ⁻¹]

m_{nv}	hmotnostní průtok napájecí vody článkem	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
m_p	parní výkon článku	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
m_{pc}	celkový parní výkon parogenerátoru	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
m_{pk}	hmotnostní průtok podchlazené kapaliny	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
m_{sv}	hmotnostní průtok syté vody	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
n_{ξ}	počet článků v jedné smyčce	$[-]$
n_s	počet cirkulačních smyček	$[-]$
n_{tr}	počet teplosměnných trubek	$[-]$
o_{II}	omočený obvod mezitrubkového prostoru	$[\text{m}]$
p_I	tlak primárního média	$[\text{MPa}]$
p_p	tlak syté páry	$[\text{MPa}]$
q_v	měrný tepelný tok ve výparném úseku	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$
s	odchylka odhadovaného a skutečného měrného tepelného toku	$[\%]$
t_I	teplota primárního média	$[\text{°C}]$
t_{ID}	teplota primární vody na vstupu do dohřívacího úseku	$[\text{°C}]$
t_{nv}	teplota napájecí vody	$[\text{°C}]$
t_p	teplota syté páry	$[\text{°C}]$
t_{pk}	teplota podchlazené kapaliny	$[\text{°C}]$
t_{trs}	střední teplota stěny teplosměnných trubek	$[\text{°C}]$
Δt_d	střední logaritmický spád v dohřívacím úseku	$[\text{°C}]$
Δt_v	střední logaritmický spád v dohřívacím úseku	$[\text{°C}]$
w_{Is}	střední rychlost primárního média	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
w_{IIs}	střední rychlost sekundárního média	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
α_I	součinitel přestupu tepla na straně primárního média	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
α_{II}	součinitel přestupu tepla na straně sekundárního média	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
ε_i	součinitel vlivu náběhu proudu na svazek trubek	$[-]$
ε_s	součinitel vlivu roztečí	$[-]$
λ_I	součinitel tepelné vodivosti primárního média	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
λ_{II}	součinitel tepelné vodivosti sekundárního média	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
λ_{no}	součinitel tepelné vodivosti nerezové oceli	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
λ_{tr}	součinitel tepelné vodivosti teplosměnných trubek	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
ρ_I	hustota primární vody	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
ρ_{ID}	hustota primární vody na vstupu do dohřívacího úseku	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
ρ_{Is}	střední hustota primárního média	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
ρ_{II}	střední hustota sekundárního média	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
ρ_{sv}	hustota syté vody	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$

ρ_p	hustota syté páry	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
ρ_{pk}	hustota podchlazené kapaliny	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
ν_I	kinematické viskozita primárního média	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
ν_{II}	kinematické viskozita sekundárního média	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$

1 Úvod

V dnešní době se stále větší důraz klade na ochranu životního prostředí a používání obnovitelných zdrojů energie. Obnovitelné zdroje energie lze však užívat jen omezeně, jelikož lidstvo zatím není schopno ekonomicky ve velkém množství energii uchovávat, což by vzhledem k jejich nestálosti a proměnlivosti bylo zapotřebí. Navíc ani samotný provoz většiny energetických zařízení čerpajících energii z obnovitelných zdrojů není ekonomický, na což doplácí velkou měrou spotřebitelé elektrické energie v podobě poplatku zvaného „Příspěvek na obnovitelné zdroje“. Podle Světové rady pro energii (World Energy Council - WEC) dojde k navýšení globální potřeby zdrojů elektrické energie na dvojnásobek již do 25 let. [20] Ačkoliv se emisní limity stále zpřísňují, je vyvíjen tlak na energetickou úspornost spotřebičů a snaha o zvyšování účinnosti zařízení sloužících k výrobě elektrické energie roste, dojde k markantnímu zvýšení vyprodukovaných emisí. Zejména nejčastěji zmiňovaných emisí CO₂, neboť rozvojové státy nenastolují stejně přísné emisní limity jako například státy Evropské Unie, kvůli urychlení ekonomického vývoje. Z fosilních paliv vhodných pro výrobu elektrické energie je jediná ekonomicky bezpečná surovina uhlí, a to černé i hnědé, jelikož je ho dostatek, je levnější než jiná fosilní paliva a je relativně rovnoměrně rozmístěno po celé planetě. Na rozdíl od zemního plynu, u nějž 60 % veškerých zdrojů je v držení Ruska, Íránu a Kataru, nebo ropy. 20 % světových zásob ropy náleží Saudské Arábii, a do konce roku se 2020 se do dominantního postavení v oblasti produkce dostane Amerika, díky těžbě ropy z břidlice. Kromě Ameriky však tyto země nemají potenciál spolehlivého ekonomického partnera pro vyspělé západní státy, s ohledem na politickou nestabilitu. Jak jsem již zmínil, nejvhodnějším palivem po ekonomické stránce se tedy jeví uhlí. Z uhlí však do ovzduší i přes všechny snahy uniká stále obrovské množství tuhých i plyných znečišťujících látek.

Alternativou k tomuto palivu v jaderné energetice by měl být Uran, jelikož jsou jeho ložiska též rovnoměrně rozmístěna po celém světě. Jaderná energetika se vzhledem ke zvýše zmíněným faktům zdá být, ve srovnatelném měřítku produkce, nejekologičtějším zdrojem elektrické energie. Tak jako produkce energie z paliv fosilních, i získání energie z jádra má svá úskalí. Ekvivalentem problému znečištění tuhými a plynými látkami je však bezpečnost. Hlavní riziko pro člověka a tudíž zásadní věc k řešení. Jde o bezpečnost jak provozu, tak i uskladnění vznikuvšího jaderného odpadu. Bezpečnost je v tomto odvětví energetiky často diskutovaná věc, a podobně jako ekologie, i bezpečnosti více dbají státy vyspělé. Není náhodou, že stále má jaderná energetika mnoho odpůrců, zejména ze strany laické veřejnosti.

Tato kritika je hnacím motorem na cestě za co nejbezpečnějším ziskem energie z jádra. Informace o aktuálním dění a vývoji v oblasti jaderné energetiky shromažďuje a na svých stránkách prezentuje Mezinárodní agentura pro atomovou energii (International Atomic Energy Agency - IAEA). IAEA je mezinárodní organizace stanovující pravidla pro mírové využívání jaderné energie a dohlízející na jejich dodržování. Rovněž je i orgánem zodpovědným za kontrolu dodržování Smlouvy o nešíření jaderných zbraní. V dnešní době má organizace stanovené 3 oblasti působnosti jako zásadní: bezpečnost a ochrana, věda a technologie, a v neposlední řadě ochrana a ověřování. To jen potvrzuje výše zmíněný trend zvyšování bezpečnostního hlediska. Tato politika je klíčová pro vývoj jaderné energetiky, coby zdroje energie pro budoucnost. Ve snaze zvyšování bezpečnosti dospěl vývoj právě až k malým modulárním jaderným reaktorům, jejichž menší rozměry je předurčují k snazší zabezpečitelnosti. U malých modulárních jaderných reaktorů se zdá být bezpečnost překonaným problémem. Dle papírových předpokladů by měly být dokonce bezpečnější než reaktory velké. Úskalím však může být absence podrobných ekonomických studií, které by mohly konkrétními čísly přesvědčit investory. Zda bude jejich velikost a modulárnost opravdu cestou ke snížení nákladů a tím i doby návratnosti však potvrdí až první komerční aplikace.

Dílčím cílem mé práce je seznámit čtenáře s koncepcí malých modulárních jaderných reaktorů. Shrnout již dostupné poznatky o nich, zpracovat česky psaný ucelený přehled komerčních konceptů těchto reaktorů a podat objektivní zprávu o aktuálním stádiu jejich vývoje i aplikace. Na základě toho pak shrnout jejich potenciál a vhodnou roli v budoucnosti jaderné energetiky. Hlavním cílem mé práce je zvolit vhodný parogenerátor pro malou jadernou teplárnu sdílející inovativní myšlenky modulárních reaktorů a navrhnout jeho rozměry.

2 Malé modulární jaderné reaktory [9, 13]

Malé modulární jaderné reaktory (Small Modular Reactors - SMR) jsou jaderné reaktory s výkonem do 300 MW_e, dle klasifikace IAEA. Modulární konkrétně znamená, že se jedná o konstrukci stavebnicového typu. Čili je sestaven z mnoha menších částí, které jsou až na místě smontovány v kompaktní celek. Tento fakt SMR předurčuje k sériové výrobě, což by mohlo urychlit a zjednodušit jejich aplikaci do energetického systému. Charakteristická je pro ně vyšší bezpečnost, jakož i z výše zmíněných faktů vyplývající kompaktnost. První SMR vznikly pro vojenský průmysl již v období studené války. Jejich provoz pro komerční výrobu energie by nebyl ekonomický, avšak díky malým rozměrům a velké zásobě energie v palivu, se staly velice vhodnou pohonnou jednotkou pro letadlové lodě, či jaderné ponorky. Díky vývoji těchto reaktorů pro vojenský průmysl, a s tím souvisejícími nabytými poznatky a zkušenostmi, je nyní značně snazší cesta k vývoji reaktorů, jejichž provoz by již měl mít ekonomickou návratnost. Zatím je celá tato snaha v oblasti vývoje, a to i přesto, že na světě funguje celkem 133 reaktorů řazených do generace III+ a IV. Žádný z nich však není komerčně dostupný. Všechny tyto reaktory spadají pod státy, či výzkumné instituce. Jako předvoj éry komerčních projektů těchto reaktorů by měly být v nedaleké době dostavěné 4 SMR. Tři sloužící k výrobě elektrické energie (CAREM-25, HTR-PM a KLT-40S), z toho jeden je koncipován jako plovoucí jaderná elektrárna (KLT-40S), a čtvrtý slouží k pohonu ledoborce (RITM-200). Řádově disponují výkonem 50–250 MW_e a do provozu by měly být uvedeny mezi lety 2016 a 2018. [10]

3 Charakteristika a srovnání s nyní používanými typy JR [12]

Obsahem této kapitoly jsou základní charakteristické rysy SMR. Jejich popis je provázen i občasným srovnáním s reaktory velkými (Large Reactors – LR).

3.1.1 Bezpečnost

Značným krokem kupředu by měla být hlavně vyšší bezpečnost. Jaderné elektrárny využívající SMR by měly disponovat pasivními bezpečnostními systémy. Konstrukční uspořádání primárního okruhu tlakovodních SMR je většinou integrální, tedy celý primární okruh je uvnitř tlakové nádoby. V případě nečekaných událostí, jako např. zemětřesení, se reaktor okamžitě odstaví a nebude třeba žádný vnější zdroj napájení chlazení, jelikož reaktor mnohdy i během výkonového stavu využívá pouze přirozené cirkulace paliva.

Snazšímu chlazení napomáhá hlavně lepší poměr povrchu k objemu, oproti velkým reaktorům. Většina typů reaktorů navíc počítá se zapuštěním konstrukce do země pro lepší ochranu před možnými fyzickými útoky či přírodními katastrofami. V případě potřeby tak může být relativně snadno vybudovaný silný betonový štít kolem celé elektrárny k zabránění úniku radiace. Díky větší bezpečnosti a menší zastavěné ploše lze jadernou elektrárnu vybudovat i v blízkosti měst. Tím pádem bude možné i plně využít dosud odpadní teplo. To jsou zhruba dvě třetiny celkově vyprodukované energie. Jaderná elektrárny poblíž města by tedy mohla být zároveň i teplárnou.

3.1.2 Provozní náklady

Vzhledem k probíhajícímu vývoji a absenci komerční aplikace zatím nejsou známa zcela konkrétní a ověřená čísla. Veškeré finanční bilance vychází z teorie a odhadů, a vzhledem k nedokončeným vývojovým programům se ještě mohou měnit. Obecně by však v porovnání s velkými reaktory měly vycházet lépe. Náklad na jednotku vyrobené energie se sice zdá být vyšší. Brali-li bychom tyto reaktory pouze jako zmenšeniny, byl by to i fakt. Avšak modularizace a menší rozměry těchto reaktorů skýtají i mnoho ekonomických výhod. Část z nich patří k nákladům investičním. Co se týče provozních nákladů, jedním z očekávaných zlevňujících aspektů měla být délka cyklu výměny paliva. Zatímco u stávajících reaktorů je délka cyklu výměny paliva 12 až 24 měsíců, u SMR se počítá s 3 až 4 letými cykly, u některých se dokonce prodlouží na 8 až 10 let a výjimečně může dosahovat až 20 let, díky unikátním směsem paliva. Tím se sníží náklady na vysoce specializované a certifikované pracovníky, již výměnu provádějí. K chlazení reaktoru dochází přirozenou cirkulací chladiva, tím se zjednodušuje celý systém a ubývá dynamických prvků, což hlavně snižuje náklady na provoz i údržbu, stejně jako náklady pořizovací. Jaderné elektrárny s modulární skladbou jsou navíc konstruovány tak, aby se snížila potřeba personální obsluhy a některé typy by měly být i zcela bezobslužné.

3.1.3 Investiční náklady

Z hlediska politických rozhodnutí v oblasti energetiky již začíná být riskantní investovat do velkých jaderných elektráren, zejména pro jejich dlouhou návratnost. Menší investice do malé elektrárny s kratší dobou návratnosti je bezpečnější. Dalším faktem hovořícím pro tyto elektrárny je jejich modularizace. Nebude se již jednat o zcela unikátní reaktory, takže bude možné zavést jednotné postupy výstavby a montáže. Tím se celá výstavba zjednoduší, zlevní i zrychlí. Na rozdíl od velkých jaderných reaktorů, u kterých se již díky komplikovanosti

výstavby mnoho projektů opozdilo. Například ve Finském Olkiluotu se výstavba reaktoru EPR protáhla ze 4 na 11 let, přičemž náklady vzrostly o 234 % na konečných 10,7 mld. Eur. Sériová výroba navíc umožní snížení výrobních nákladů. Díky skládačkovému principu bude možnost měnit jednotlivé díly, které budou snáze vyrobitelné, než když se jednalo téměř o unikátní kusy. Přeprava menších dílů bude také levnější. Při potřebě většího výkonu elektrárny lze na jednom místě aplikovat několik reaktorů, přičemž více reaktorů může sdílet některé technologické celky.

3.1.4 Přenosová síť

Možnost umístění do místa spotřeby omezí ztráty vedením v rozvodové síti, jelikož se většina energie spotřebuje v blízkosti místa výroby energie. V otázce rozvodových sítí skýtá menší výkon i další výhody. Rovnoměrné rozmístění většího počtu menších zdrojů energie navíc sníží zatížení soustavy. Snazší regulovatelnost umožňuje reagovat na výkyvy sítě nebo můžou SMR posloužit i jako špičkové zdroje energie. Navíc výpadek či odstávku malého zdroje energie lze nahradit jiným záložním zdrojem snáze, než výpadek velkého jaderného reaktoru.

3.1.5 Možnosti využití

Vzhledem k výše uvedeným charakteristikám se nabízí mnohé využití. V našich ekonomických podmínkách by byly ideální lokální zdroje elektrické energie a zároveň tepla. Vystavěny v blízkosti měst, čili místa spotřeby, sníží zatížení přenosové soustavy. Menší z nich navíc můžou posloužit přímo pro velké průmyslové podniky s vysokou potřebou tepla pro své technologie.

Další výhodu skýtá pro odlehlé oblasti. Tam je mnohdy problém, že vybudování přenosové soustavy na velkou vzdálenost je drahé a transportní ztráty jsou vysoké. Díky snazšímu převozu a montáži přímo na místě by se mohly stát zdrojem energie pro ostrovy, arktické oblasti, či oblasti bez vyvinuté infrastruktury.

Pro rozvojové země mohou být výbornou alternativou k velkým jaderným reaktorům, které si nemohou dovolit. Nárůst produkce navíc nebude skokový, takže se může výkon zvyšovat postupně a úměrně rostoucím potřebám průmyslu a populace.

4 Ekonomické zhodnocení [13]

V návaznosti na kapitoly 2.1.2 a 2.1.3 jsem vybral několik SMR, u nichž můžeme srovnat provozní a investiční náklady. Jedná se o reaktory SMART, NuScale, KLT-40S, VBER-300, mPower, FUJI, IRIS, GT-MHR a HPM. Náklady budou srovnány s průměrnými náklady na velký reaktor (LR). Od těchto nákladů se odvíjí prostá doba návratnosti. Ta vypovídá o ekonomické výhodnosti projektu nejvíce, ačkoliv tento ekonomický prostředek není zcela přesný. Pro účely tohoto srovnání je však dostačující, neboť nepřesnosti, jako například zanedbání inflace, jsou pro všechny reaktory společné, tudíž neovlivní pořadí reaktorů, nýbrž jen konečný časový údaj. V následujících tabulkách (1 a 2) jsou data v každém sloupci seřazena od nejmenších po největší.

Tab. 1: Investiční a celkové provozní náklady

Reaktor	Investiční náklady [\$/kW _e]	Reaktor	Celkové provozní náklady [\$ kWh]
IRIS	1 400	VBER-300	7 100
GT-MHR	1 460	KLT-40S	10 700
FUJI	1 584	FUJI	11 800
VBER-300	2 800	GT-MHR	12 200
mPower	3 000	HPM	14 740
HPM	4 000	NuScale	22 230
NuScale	4 000	mPower	23 300
KLT-40S	4 200	LR (1200MW _e)	24 070
SMART	5 000	IRIS	36 200
LR (1200MW _e)	6 150	SMART	37 300

Zdroj: vlastní zpracování dle [13]

Tab. 2: Prostá doba návratnosti

Reaktor	Prostá doba návratnosti
GT-MHR	3
FUJI	4
IRIS	6
VBER-300	6
mPower	9
KLT-40S	11
HPM	12
NuScale	13
LR (1200MW _e)	16
SMART	25

Zdroj: vlastní zpracování dle [13]

Zajímavostí je, že u reaktoru IRIS i přes vyšší celkové provozní náklady oproti VR je prostá doba návratnosti podstatně nižší. Můžou za to výrazně nižší investiční náklady. Téměř všechny reaktory dle očekávání ve srovnání po ekonomické stránce obstály. Výjimkou je reaktor SMART, u kterého díky největším celkovým provozním nákladům i velice vysokým investičním nákladům byla doba návratnosti spočtena jako nejdelší. Zapříčiněno to je zejména vysokými náklady spojenými s vývojem technologií, které zatím nejsou pro tento reaktor zcela zvládnuté.

4.1 Shrnutí

Po ekonomické stránce již byla prokázána výhodnost SMR. Menší investiční i celkové provozní náklady a kratší doba návratnosti by měly být pro investory lákavé. I přesto však bude nutné provést detailní ekonomické analýzy hovořící v přesnějších a konkrétnějších číslech, neboť investice si vyžadují přesná čísla a ne jen přísliby. První komerční aplikace jakýchkoliv SMR budou zřejmě dražší kvůli své prozatímní unikátnosti, což ovlivní i ekonomické studie. Na přesná čísla asi bude nutné počkat déle. Překonaný je i problém bezpečnosti. Konstrukčně jsou SMR bezpečnější než velké reaktory a problém nebyl shledán ani v oblasti ochrany proti zneužití jaderného materiálu. Tím, co však stojí v cestě dalšímu kroku komerčního využití energie z jádra, je složité získání licence a nepřipravenost veřejnosti na tuto podobu jaderné energetiky.

5 Reaktorové systémy [9, 11, 16, 17, 21]

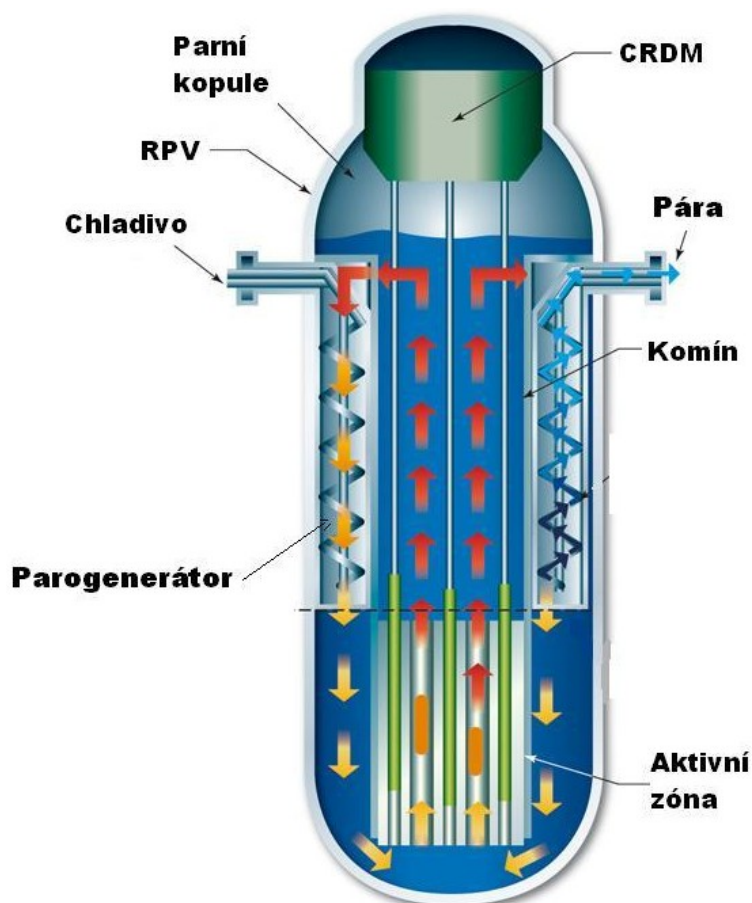
Kapitola obsahuje ucelený přehled všech aktuálně vyvíjených komerčních konceptů SMR, vyjma reaktorových systémů řadících se ke čtvrté generaci. Postupně tedy budou popsány reaktory moderované lehkou a těžkou vodou. Následovat bude krátký obecný úvod k reaktorům generace IV.

5.1 Lehkou vodou moderované SMR

V této kapitole je přehled a popis reaktorů, které využívají jako moderátor lehkou vodu, tedy lehkovodní reaktory (LWR – Light Water Reactor). Může se jednat buď o reaktory tlakovodní (PWR – Pressurized Water Reactor), v jejichž primárním okruhu koluje voda pod tlakem neumožňujícím var vody, nebo varné (BWR – Boiling Water Reactor). Předností tlakovodních reaktorů je vysoká bezpečnost. Voda, jenž je moderátorem totiž zlepšuje svou schopnost zpomalovat neutrony s rostoucí teplotou. Zpomalením neutronů vznikne teplo, které voda odvádí z aktivní zóny tzv. primárním okruhem do parogenerátorů, kde předá teplo sekundárnímu okruhu. V tom již není tak vysoký tlak a voda v sekundárním okruhu se může vypařit a pokračovat do turbíny. Varné reaktory jsou však jednookruhové. Voda se vypaří přímo v aktivní zóně a stoupá do separátoru. Tam je oddělena pára od vody a pára pokračuje do turbíny. Výhodou varného reaktoru je vyšší účinnost, nižší tlak v primárním okruhu a nepotřeba parogenerátorů, jelikož se pára vytváří přímo v aktivní zóně reaktoru. Nevýhodou však je možné přenášení radioaktivity až k turbíně, a nemožnost použití kyseliny borité pro kompenzaci přebytečné radioaktivity z důvodu sdílení vody s turbínou.

5.1.1 CAREM-25

CAREM-25 je argentinský projekt, vyvíjen Argentinskou národní komisí pro atomovou energii (CNEA) a předními argentinskými společnostmi zaměřenými na jadernou energetiku. Podporující domácí ekonomiku, minimálně 70 % komponentů a souvisejících služeb bylo pořízeno od argentinských společností. Jedná se o integrální typ PWR projektovaného na výkon 27 MW_e. Hlavní charakteristikou by měl být bezpečnostní systém spoléhající na přirozený oběh primární vody a hydraulicky ovládané řídicí tyče umístěné uvnitř tlakové nádoby. V Současné době probíhá výstavba v Limě (Argentina, Buenos Aires) poblíž jaderné elektrárny Atucha 2. Projekt byl jeden z prvních konceptů SMR. Po předložení a schválení všech bezpečnostních analýz započaly roku 2011 výkopové práce a poslední testy řídicích systémů, o rok později už výstavba, a začátek komerčního provozu je očekáván v roce 2018.



Obrázek 1: Schéma reaktoru Carem-25

Zdroj:

<http://www.neimagazine.com/uploads/newsarticle/4266787/images/454099/large/icenes%20fig%201.jpg>

Projekt je předchůdce prototypu CAREM, který by měl CAREM-25 následovat již s navýšeným výkonem na 150–300 MW_e. Výstavba CAREM je plánována v provincii Formosa. S malým výkonem i rozměry cílí spíše na odlehlé oblasti a počítá se s kogenerační výrobou elektrické energie i tepla, například pro odsolování mořské vody.

Specifické konstrukční a bezpečnostní prvky

Mechanismus řídicí kontrolní tyče (Control Rod Driving Mechanism – CRDM), kompenzátor objemu i 12 mini-spirálových průtočných parogenerátorů je umístěno uvnitř reaktorové tlakové nádoby (Reactor Pressure Vessel – RPV).

Umístění parogenerátorů nad aktivní zónu reaktoru zajišťuje přirozenou cirkulaci vody v primárním okruhu. Vlivem vysokých teplot na výstupu z aktivní zóny a tlaku v okruhu se v kompenzátoru objemu a kopuli pohybujeme blízko saturační teplotě. Za všech provozních podmínek se to ukázalo dostačujícím k zajištění požadovaného výkonu a stability chladicího systému reaktoru. Kontrolní systém je schopen udržet tlak na provozní hodnotě v různých stavech, i při najíždění a odstavování reaktoru, bez nutnosti velkých zásahů do polohy řídicích tyčí. Tím se eliminuje riziko nehody způsobené ztrátou chladiva (Loss Of Coolant Accident – LOCA). Sekundární okruh je podobný těm, v klasických PWR. Do protiproudých výměníků ve 12 parogenerátorech je v trubkách pod tlakem hnána voda elektricky poháněnými čerpadly. Vodorovným potrubím klesá dolů a na cestě zpět vzhůru už je potrubí spirálovité. Na výstupu se vypařuje a pokračuje dále do turbíny.

Bezpečnostní systém CAREM-25 se skládá ze dvou systémů ochrany reaktoru, dvou vypínacích systémů, dvou systémů pasivního odvodu zbytkového tepla (Passive Residual Heat Removal System – PRHRS), bezpečnostních ventilů, nízkotlakého vstřikovacího systému a systému odtlačování vstřebávajícím přetlak. Bezpečnostní systémy jsou duplicitní, a jsou navrženy tak, aby splňovaly zákonné požadavky na bezpečný provoz jaderné elektrárny. Po dobu 36 hodin dokáže PRHRS zajistit bezpečnou teplotu jádra reaktoru v případě výpadku chladiče či celé stanice. Systém se skládá z U-trubicových kondenzátorů vedoucích do parní kopule a dalších vstupujících do RPV v místě napojení primárního okruhu do parogenerátoru. Teplo z kondenzátorů je odváděno do k tomu určených vodních nádrží a celý proces probíhá pouze přirozenou cirkulací. Počítá se s možností i více než 72 hodinového výpadku stanice, protože jsou jako prevence vážných nehod přichystána záložní elektricky poháněná čerpadla, hasicí zařízení a další výše zmíněné systémy k podpoře účinku PRHRS.

Charakteristika paliva a palivového cyklu

Celkem 61 palivových souborů s aktivní délkou 1,4 m v šestiúhelníkovém uspořádání pojímá 108 palivových tyčí obsahujících pelety UO_2 obohacené izotopem ^{235}U na 3,1 %, gadolinium, vodící trubice pro řídicí tyče a 19 přístrojových tyčí, monitorujících tok neutronů a teplotu v jádru reaktoru.

5.1.2 ACP-100

Koncept nového lehkovodního reaktoru vyvíjeného CNNC (China National Nuclear Corporation) o výkonu 100 MW_e (310 MW_t) je založen na bázi známých PWR. Opět se jedná o integrální uspořádání. Na rozdíl od reaktoru CAREM-25 je možné seskupit až 8 reaktorů ACP-100 v jedné elektrárně. V tomto roce byly předloženy detailní konstrukční plány dvou demonstračních jednotek, jejichž stavba by měla být započata v roce 2017 ve Fujianu.

Specifické konstrukční a bezpečnostní prvky

Kompenzátor objemu se nachází vně RPV a uvnitř je namontováno nouzové čerpadlo. CRDM mění polohu řídicích tyčí magnetickou silou. Reaktorová budova a nádrž na vyhořené palivo je umístěna pod zemí kvůli zlepšené ochraně před možným poškozením z venku, a snížení uvolňování radiace z paliva.

ACP-100 splňující charakteristiky inherentní bezpečnosti eliminuje riziko ztráty chladiva v chladicím potrubí. Systém pasivního odvodu tepla dokáže v případě nehody chladit jádro

reaktoru po dobu 3 dnů, bez zásahu obsluhy, nebo až 14 dní pomocí vody z nouzové chladicí nádrže, jež je hnána pouze gravitační silou. Pro případ nutnosti použití nouzových prvků, je co sedm dní dobíjena baterie koncipovaná na 72 hodin provozu. Chladicí systém také počítá s ochranou před vypařením vody z nádrže na vyhořelé palivo, a i v případě maximální naplněnosti nádrže (vyhořelé palivo za 10 let) je schopen uchládit vodu v této nádrži až sedm dní.

Charakteristika paliva a palivového cyklu

Čtvercové uspořádání 17x17 palivových tyčí plněných UO_2 o očekávaném obohacení 2,4–3,0 % v 57 palivových souborech s aktivní délkou 2,15 m je schopno přeměňovat kinetickou energii neutronů na tepelnou přibližně po dobu 24 měsíců. K regulaci procesu bude kromě řídících tyčí využívány i bor a gadolinium. Doba výměny paliva, po kterou je nutné reaktor odstavit, se předpokládá zhruba 40 denní. V roce 2012 již vyrobila firma Jianzhong, dceřiná firma CNNC, vzorky paliva a řídících tyčí.

5.1.3 Flexblue



Obrázek 2: Flexblue

Zdroj: <http://www.world-nuclear-news.org/uploadedImages/wnn/Images/Flexblue.jpg>

Flexblue je unikátní francouzský koncept podmořské elektrárny s PWR o výkonu 160 MW_e. 146 m dlouhý modul o průměru 14 m je stabilně upevněn k mořskému dnu v hloubce zhruba 100 m pod vodní hladinou. Flexblue by po sestavení v přístavu měl být do kotvicí lokace dotažen lodí a výměna paliva spolu s pravidelnou údržbou by měla probíhat v témže místě, jako jeho sestavení. Slouží pouze k produkci elektrické energie, která je pomocí podvodních

kabelů dopravena na pobřeží do rozvodové sítě. Na jednu podvodní síť je možno napojit více reaktorů, avšak celkový počet je limitován možnostmi hlavní ovládací místnosti, která je na pobřeží. Z toho byl vyvozen maximální počet 6 reaktorů na jednu ovládací místnost. Svým umístěním získává možnost časově i kapacitně neomezeného pasivního chlazení. Nasazení těchto reaktorů je plánováno na rok 2025. O licenčním a certifikačním procesu však zatím nejsou informace.

Specifické konstrukční a bezpečnostní prvky

Co 40 měsíců spolu s výměnou paliva je prováděna pravidelná údržba. Generální opravy jsou plánovány zhruba co 10 let, pravděpodobně po 3 cyklech vyhoření paliva. Při převozu jsou všechny systémy vždy vypnuty, kromě PRHRS a monitorovacích systému. Na konci životnosti je celý modul dovezen zpět a demontován. Reaktivita je řízena bez rozpustného boru, což umožňuje snazší správu chemického řízení a snižuje záření vyhořelého paliva. V modulu jsou dvě suché sekce obsahující nouzové baterie, záložní ovládací místnost, ovládací panely, náhradní díly, prostory s podmínkami pro bezpečný pobyt obsluhy a nouzová záchranná zařízení.

Voda chrání moduly před nebezpečím jako pád letadla, tsunami, nebo hurikány. Zároveň poskytuje permanentní pasivní chlazení. Kvalita vody bude monitorována, avšak ani při úniku radiace nehrozí rychlé zdravotní dopady na populaci vlivem znečištění vody. Reaktor je zajištěn proti pohybu uvnitř modulu a všechny chladicí systémy jsou pasivní, včetně dvou nouzových vodních nádrží. Bez zásahu obsluhy tak jsou schopny ihned reagovat na možnou nehodu. Záložní baterie v podstatě slouží pouze k udržení aktivity monitorovacích a řídicích zařízení.

Charakteristika paliva a palivového cyklu

Nositel chemické energie pro reaktor je 77 palivových souborů s čtvercovým uložením 17x17 palivových tyčí. Jejich aktivní délka je 2,15 m. Palivem je UO_2 v Zircaloyovém opláštění obohacený maximálně na 5 %. Cyklus výměny paliva je dimenzován na 40 měsíců, vzhledem k problematickému a nákladnému procesu vytažení modulu z mořského dna.

5.1.4 DMS

Tento varný reaktor byl mezi lety 2000–2004 vyvíjen společností GEH (GE Hitachi nuclear energy, vzniknuvší spojením firem General Electric a Hitachi). Očekávané před-schválení základního projektu mělo proběhnout v roce 2014, avšak v Japonsku momentálně není

plánovaná výstavba žádného SMR a tudíž Japonsko nevydává s tím spjaté licence. Jedná se o LWR o výkonu 300 MW_e (840 MW_t) s přirozenou cirkulací v primárním okruhu. K separaci páry dochází uvnitř RPV.

Reaktor je vhodný pro větší oblasti, které jsou však limitované rozpočtem a vyvinutostí přenosových sítí. Vhodně lze využít i nemalou produkci technologického tepla, avšak stejně jako u všech výše zmíněných reaktorů pouze pro nízkoteplotní procesy (odsolování mořské vody, extrakce ropných písků, zásobování teplem).

Specifické konstrukční a bezpečnostní prvky

Důraz je kladen hlavně na minimalizaci a zjednodušení. V rámci úspory prostoru se zjednodušovalo vše. Snížila se aktivní délka paliva na 2 m, což umožňuje zmenšit výšku RPV, sníží výkon i tlakovou ztrátu. Tím se sníží i rychlost odpařování vody a vzniknuvší pára má v horních prostorech nádoby velmi malou kinetickou energii. Tím odpadá nutnost použití separátoru páry, jelikož z pomalu proudící páry jsou kapičky vody odděleny přirozeně gravitační silou. Snížením množství a velikostí funkčních prvků a reaktorové nádoby se oproti předchozím typům stal komplex pouze čtyřpodlažním. To zlevňuje a zrychluje dobu výstavby a náklady na ní.

Pro zlepšení bezpečnosti proti vnějším vlivům je reaktorová budova částečně uložena pod zem. Při návrhu havarijního chladicího systému aktivní zóny rovněž nebylo opomenuto ekonomických hledisek. Navržen byl tak, aby byl schopen v případě nutnosti uchladiť aktivní zónu zalitím jádra reaktoru i bez vysokotlakých vstřikovacích systémů. Tento nouzový systém se však neobejde bez nouzového napájení. Po prozkoumání analýzy LOCA byl systém shledán dostatečně účinným k zajištění požadované bezpečnosti. Oproti velkým ABWR se liší ve 3 hlavních bodech, jež dělají reaktor DMS bezpečnějším. Systém chlazení zaplavením reaktoru s vysokotlakým vstřikováním chladiva užívaný u ABWR je eliminován díky větší poměrné zásobě chladiva uvnitř RPV. Jsou přidány pasivní systémy chlazení kontejnmentu jako ochrana před delšími výpadky stanice. Pomocí izolovaných kondenzátorů jsou schopny uchladiť RPV až 10 dní. Podíl na tom má i hybridní systém chlazení jádra reaktoru složený ze dvou systémů. Pasivní systém vstřikování chladicí vody pomocí páry vzniklé v RPV a čerpadlem poháněný systém nízkotlakých trysek zaplavujících reaktor chladicí vodou.

Charakteristika paliva a palivového cyklu

Reaktor poháněný 400 palivovými články aktivní délky 2 m s dvouletým cyklem výměny. Palivo zatím nebylo specifikováno, ale odhaduje se zhruba 4 % obohacení. Redukce reaktivity bude prováděna 137 ze spodní části RPV zasouványými řídicími tyčemi.

5.1.5 SMART

Integrální PWR s výkonem 100 MW_e (300 MW_t) s možností kogenerace je vyvíjen Korejským výzkumným ústavem pro atomovou energii (KAREI). Ačkoliv nepatří k ekonomicky nejvýhodnějším, hlavní snaha je hnána směrem k absolutně pasivní bezpečnosti a co největší dostupnosti. V prvním případě však nebyla dotáhnutá do konce, a kromě některých aktivních prvků nouzového bezpečnostního systému je nakonec čerpadlem poháněn i primární okruh. Vývoj však ještě není u konce. Od roku 2012 kdy byla projektu schválena licence, probíhá výzkum a testování zcela pasivních bezpečnostních systémů pro novější typ, ekvivalentních k nyní používaným aktivním. Díky zvětšení nádrží na pojetí odvedeného tepla, by měl být systém schopen bez elektrické energie či jiného napájení uchlazen reaktor i kontejnment až 72 hodin. Konec testů a schválení licence se plánuje ke konci roku 2015. Jelikož zatím o reaktor není zájem, plánuje Korea postavit ukázkovou jednotku s výkonem 90 MW_e a produkcí 40 000 m³ odsolené vody denně. Pravděpodobně se však nestihne plánovaný začátek provozu v roce 2017.

Specifické konstrukční a bezpečnostní prvky

Obdobně k většině výše zmíněných PWR i SMART má všechny prvky primárního okruhu včetně parogenerátorů uvnitř RPV. Primární lehká voda je však v okruhu hnána horizontálně upevněnými čerpadly.

Aktivní i pasivní bezpečnostní prvky fungují automaticky. Kromě PRHRS portfolio bezpečnostních systému obsahuje i vypínací systém reaktoru, systém bezpečnostního vstřikování chladiva do RPV, ochranu proti přetlakování reaktoru a chladicí systém kontejnmentu. Ačkoliv je eliminována možnost velké ztráty chladiva, k malým ztrátám může dojít. Kombinace aktivních a pasivních bezpečnostních prvků by si s tím však dle testů měla poradit. Ani v případě výpadku napájení elektrickou energií by PRHRS neměl dopustit přehřátí jádra reaktoru. Kontejnment by měl vydržet velmi vysoký stupeň zemětřesení i náraz letadla. Tyto bezpečnostní prvky byly úspěšně ověřeny v modelových i reálných testovacích podmínkách.

Charakteristika paliva a palivového cyklu

Pohonem reaktoru by mělo být 57 palivových souborů se standardním 17x17 čtvercovým uložením palivových tyčí s UO_2 peletami obohacenými na maximálně 5 % o aktivní délce 2 m. Palivový systém vydrží 990 dní plného celodenního provozu. Co 36 měsíců tedy probíhá 36 denní odstávka k výměně vyhořelého paliva. Reaktivitu reguluje CRDM v kombinaci s borem a gadoliniem. Možnosti užití paliva jsou však flexibilní a SMART je schopen se přizpůsobit požadavkům zákazníků. V rámci prevence zneužití jaderného materiálu, nebude palivo obohacováno na více než 5 % a i přes velkou technickou náročnost výměny paliva, bude po celou dobu prostor monitorován kamerovými systémy CCTV k zabránění neoprávněnému přístupu k palivu.

5.1.6 KLT-40S [7]

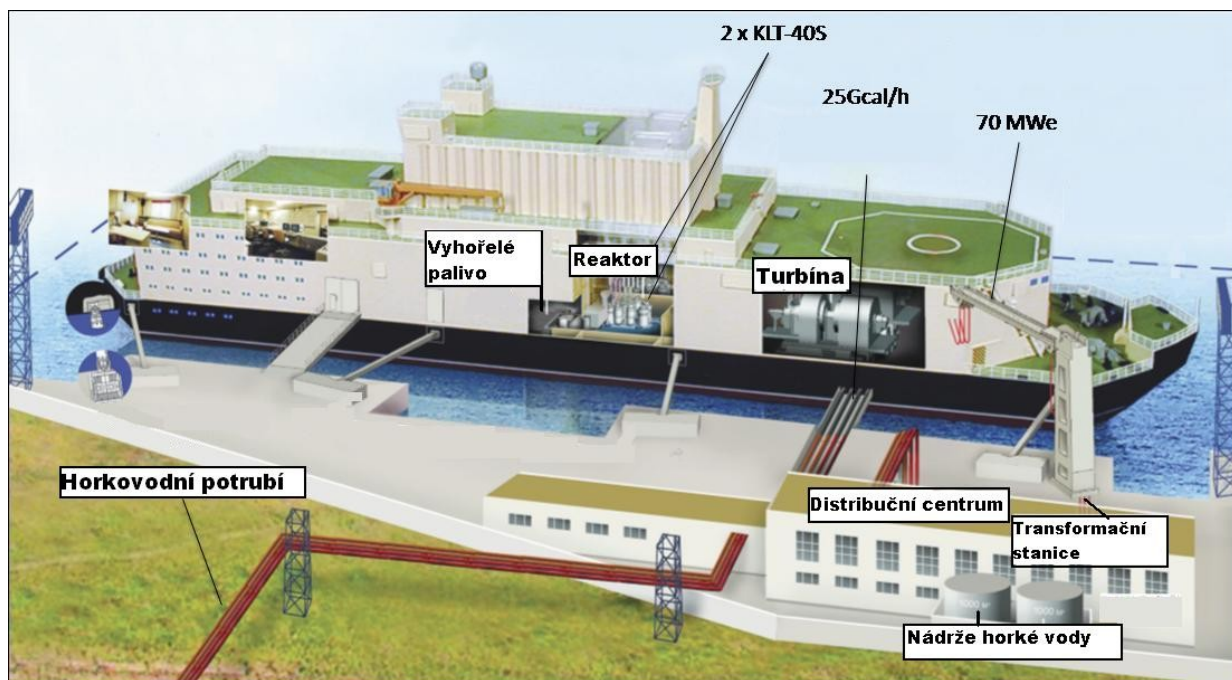
Elektrárna s PWR postavena na bázi fungujícího reaktoru sloužícího k pohonu ledoborců. Vyvinuta společností OKBM Afrikantov, předním výrobcem reaktorů v Rusku. Unikátní projekt celé elektrárny na platformě plovoucí po vodní hladině (Akademic Lomonosov se stane 1. plovoucí elektrárnou využívající 2 moduly KLT-40S) má výkon 150 MW_t nebo 38,5 MW_e . V případě potřeby odsolování mořské vody je možná kogenerace 35 MW_t i 35 MW_e zároveň. Další výhodou je, že v případě potřeby může být elektrárna snadno přemístěna a napojena na rozvodovou síť v jiném místě, ovšem s nutností vybudování pobřežního zázemí. V roce 2002 Rusko obnovilo projekt plovoucích jaderných elektráren a navázalo tak na projekt ukončený roku 1988. O pět let později započala výroba reaktoru a souvisejících komponent elektrárny v Petrohradě a v roce 2012 bylo dohodnuto první místo působnosti. Tím se stane město Pevek v autonomní oblasti Čukotka. V současné době je ve výstavbě a začátek jejího komerčního využití je plánován na rok 2017.

Specifické konstrukční a bezpečnostní prvky

KLT-40S potřebuje 12–15 m hlubokou vodu a rozlohu zhruba 30 000 m^2 . Reaktor má modulární konstrukci propojující jádro reaktoru, parogenerátory a hlavní oběhová čerpadla krátkými trubicemi. Reaktor má 4 smyčky s nucenou i přirozenou cirkulací, přetlakový primární okruh se zakonzervovanými motorovými čerpadly, těsnící ventily, průtočné svinuté parogenerátory a pasivní i aktivní bezpečnostní systémy. Z parogenerátorů je pára hnána potrubím do turbínové budovy. Kogenerační proces může být upraven i k výrobě tepla pro středně-teplotní procesy. Uspořádání RPV je stejné jako u reaktoru VBER-300, avšak s rozdílem, že každé oběhové čerpadlo je přímo hydraulicky napojeno na RPV. Aktivní zóna

reaktoru je pak tedy chlazená zespodu pod tlakem obíhajícím chladivem. CRDM je poháněn elektricky a pohání řídící i nouzové řídící tyče (s mnohem větším obsahem absorbátorů pro co nejrychlejší zastavení štěpné reakce).

V případě výpadku stanice je však při nouzovém provozu rychlost zasouvání bezpečnostních řídících tyčí pouze 2 mm/s. Průměrně se u jiných reaktorů pohybuje tato rychlost mezi 30 a 130 mm/s. Pro zvýšení bezpečnosti jsou systémy nouzového zastavení reaktoru poháněny různými principy. K bezpečnostním systémům patří možnost zajištění přídavných zábran proti únikům radiace způsobené závažnými nehodami, aktivní systém nouzového chlazení primárního okruhu s třetím nouzovým nezávislým okruhem pro odvod tepla do moře či jezera, podobně pracující aktivní systém chlazení sekundárního okruhu a parogenerátorů, 2 pasivní systémy odvodu tepla do nouzových vodních nádrží, z nichž se může voda odpařovat do ovzduší. Dále bezpečnostní koncept počítá s ochrannými bariérami proti různým mechanickým poškozením elektrárny a systém ochrany těchto bariér. Na plovoucí elektrárně budou instalovány i systémy ochrany před povodní, vlnobitím, kolizí s jiným plavidlem či plovoucím tělesem.



Obrázek 3: Akademik Lomonosov

Zdroj: <http://www.uxc.com/smr/images/KLT-40S.jpg>

Charakteristika paliva a palivového cyklu

Palivo 121 palivových souborů je obohaceno pod 20 % kvůli dodržení podmínek dohody o nešíření jaderných zbraní. Šestiúhelníkově uložené palivové tyče s peletami UO_2 o aktivní

délce 1,2 m musí být po vyhoření 13 dní chlazeno, než může dojít k výměně. Ta trvá zhruba 30 dní a provádí se po 3 až 4 letech provozu.

5.1.7 VBER-300 (VBER-150)

Další reaktor z produkce OKBM Afrikantov. Ve více verzích pro normální pozemní i plovoucí elektrárny s širokým rozpětím výkonu cílí tento integrální PWR na uspokojení rozmanité poptávky. VBER může dosáhnout výkonu až 600 MW_e na elektrárnu spojením šesti modulů o výkonu 100 MW_e. Typičtější by však měly být reaktory VBER-150 a VBER-300, jejichž je rovněž možno spojit do celku o výkonu 600 MW_e, avšak jen v provedení vyrábějícím pouze elektřinu. To by už dokázalo zásobit energií až třístatisícovou aglomeraci.

VBER-150 – Integrální provedení se dvěma parogenerátory navrženo pro plovoucí elektrárny. Zajímavostí tohoto provedení je dlouhá doba cyklu výměny paliva. Díky palivovým tyčím s UO₂ obohaceným na 4,7 % a velkým množstvím gadolinia ke zpomalení hoření paliva se jeho výměna provádí co 8 let.

VBER-300 – Reaktor o výkonu 295–320 MW_e (917 MW_r) s možností kogenerace a výroby tepla pro nízkoteplotní procesy. Uspořádání není integrální, ale smyčkové. Díky blízkému uspořádání smyček však není třeba žádné spojovací potrubí. Výkonová kapacita může být větší či menší, v závislosti na zvoleném provedení (standardizovaná jsou dvou-, tří- a pěti-smyčková provedení). Uplatnění měl najít v Kazachstánu, avšak i po zpracování bezpečnostních a ekonomických studií Kazachstán otálí s udělením licence pro výstavbu. Vývoj tedy dále probíhá a nebude-li reaktor postaven v Kazachstánu, Rusko jej nejspíše využije na svém území.

Specifické konstrukční a bezpečnostní prvky

Charakteristických je několik smyček s parogenerátory, jejichž trubky jsou vyrobeny z titanu. Oběh primárního systému je zajištěn hlavními oběhovými, motorem poháněnými čerpadly. Všechny prvky primárního okruhu jsou přímo spojeny s RPV, vyjma kompenzátoru objemu. Hlavní chladicí čerpadlo je poháněné jednostupňovým motorem a je postaveno na bázi vývoje 1500 již použitých čerpadel u jiných lodí.

Reaktorová a ovládací budova, nádrž na vyhořelé palivo i podpůrné bezpečnostní systémy jsou skryty pod dvojitým ochranným pláštěm, schopným odolat nárazu letadla. Ochrana před teroristickým útokem je jednou z priorit. PRHRS odvádějící teplo do nouzových vodních nádrží by měl být schopný uchlazení systém po dobu minimálně 72 hodin. Nouzové zastavení

reaktoru je prováděno zasunutím řídicích tyčí, dvěma systémy vstřikování tekutých absorbérů do aktivní zóny a dvěma systémy kontroly boru.

V případě plovoucí stanice, je celý objekt zakotven u pobřeží na 3 plovácích. 1 hlavní, na němž se nachází do řady uspořádané kompletní nezávislé reaktorové systémy (každý z nich je složen z RPV, primárního okruhu, řídicí stanice ovládající všechny aktivní prvky, a prostory pro údržbu a výměnu paliva), nádrž na vyhořelé palivo a na okrajových částech turbíny, generátory a s nimi spojené vybavení. To vše je ukryto pod ochranným ocelovým kontejnmentem. Na 2 periferních plovácích se pak nachází zbytek podpůrných prvků a na pobřeží je transformační stanice a další kontrolní budova.

Charakteristika paliva a palivového cyklu

Palivový cyklus může být v závislosti na konfiguraci 6 až 15 letý, při 2 až 5 leté palivové kampani. Palivové tyče o aktivní délce 3,5 m jsou v 85 palivových souborech hexagonálně uspořádané. Palivem je UO_2 obohacený do 5 %.

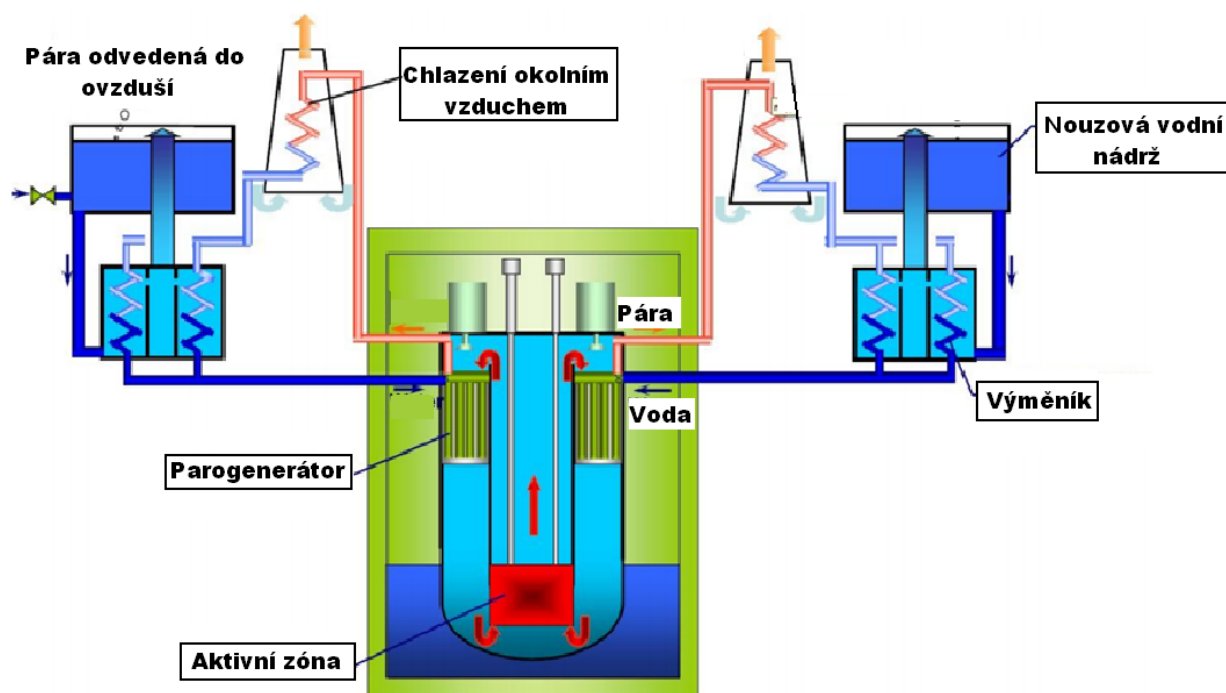
5.1.8 ABV-3, ABV-6M

Další reaktor z produkce OKBM Afrikantov. Jedná se o malou jednotku o tepelném výkonu v rozsahu mezi 18 MW_t (ABV-3) až 46 MW_t (ABV-6M) a elektrickém výkonu 4–18 MW_e . Při využití možnosti kogenerace tepla u modelu ABV-6M je kombinovaný výkon 14 MW_t a 6 MW_e . Velmi malý lehkovodní PWR pro plovoucí i pozemní elektrárny s integrálním primárním okruhem je snadno transportovatelný a může sloužit i jako pohonná jednotka lodí s hmotností do 8 tun. Všechny nouzové bezpečnostní systémy jsou pasivní, stejně jako cirkulace v primárním okruhu. Palivový cyklus celkem 121 palivových souborů s obohacením na 19,7 % trvá 10 až 12 let. Zajímavostí je, že 3 000 t těžká loď dokáže plout i po pouze 3,5 m hluboké řece. Již jsou zpracovány detailní návrhy.

5.1.9 RITM-200

Integrovaný PWR z produkce OKBM Afrikantov s nucenou cirkulací primárního okruhu by měl s výkonem 50 MW_e sloužit jako pohon ledoborců, ale nevylučuje se ani zakomponování do plovoucí a pozemní elektrárny, nebo použití reaktoru jako zdroje elektrické energie a odsolené mořské vody na vrtných plošinách. Kogenerace není možná. Reaktor využívá pasivní i aktivní bezpečnostní a nouzové bezpečnostní systémy. Samozřejmostí je i PRHRS jako u většiny SMR. Nouzově je odváděno teplo do vodních nádrží, odkud se voda odpařuje do ovzduší, a zároveň odvod probíhá přes dva výměníky chlazené okolním vzduchem,

umístěnými nad RPV. U 199 palivových tyčí obohacených pod 20 % lze regulovat aktivní délku v rozmezí 1,2 až 1,65 m, palivový cyklus trvá 54–84 měsíců a výměna paliva trvá 40dní. Nyní je již reaktor ve výstavbě a komerční zahájení provozu se očekává v roce 2017.



Obrázek 4: Nouzový chladicí systém reaktoru RITM-200

Zdroj: http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/SMR/files/IAEA_SMR_Booklet_2014.pdf

5.1.10 VVER-300

Dvousmyčkový PWR společnosti OKB Hidropress je v podstatě zmenšenou verzí klasických ruských PWR. Reaktor s výkonem 300 MW_e (850 MW_t) a možností kogenerace kombinuje aktivní i pasivní bezpečnostní systémy, vše dle nových regulí nastolených Ruskem. Zajímavostí je například dvojitý kontejnment. Cirkulace v primárním okruhu je nucená. Reakci koriguje pomocí 34 elektromagnetem ovládaných řídicích tyčí a rozpustného boru. Složení paliva i palivový cyklus jsou obdobné jako u ostatních PWR zmíněných výše.

5.1.11 VK-300

Obdobně jako u VVER-300 i tento reaktor je spíše novější verzí mnoha roky prověřených reaktorů v Rusku. Tentokrát se však jedná o integrální BWR. S cílem zvýšit bezpečnost a snížit provozní náklady je navržen tak, že všechny bezpečnostní i nouzové systémy jsou pouze pasivní. Palivový cyklus reaktoru s výkonem 250 MW_e (a zároveň 465 MW_t) je 6 letý, a palivové články standardní uspořádané do tvaru šestistěnu. PRHRS je uvnitř primárního

kontejnmentu, ale teplo odvádí do nouzových vodních nádrží, které jsou vně. V případě detekce problému voda z nádrží zalije reaktor za účelem zchlazení.

5.1.12 UNITHERM

RDIPÉ v Rusku vyvinula integrální PWR s možností kogenerační produkce 20 MW_t a 2,5 MW_e zároveň. Reaktor lze přizpůsobit požadavkům kupce ve velkém rozsahu, a při tepelném výkonu 30 MW dokáže vyrábět páru o teplotě 285 °C. Bezpečnostní a nouzové systémy jsou zcela pasivní (kromě vstřikování rozpuštěného boru), dokonce i k zasouvání řídicích tyčí je v nouzovém případě potřebná pouze gravitační síla. Reaktor lze použít k mnoha účelům a v mnoha podobách, aniž by se změnil bezpečnostní parametry. Při všech aplikacích dokáže vydržet živelné katastrofy srovnatelné s hurikány, tsunami, či zemětřesením ve Fukušimě. Reaktor je naprosto bezobslužný. Životnost je odhadována na pouhých 25 let, přičemž palivový cyklus by měl být až 20 let. V 265 palivových souborech se nachází na 20 % obohacené částičky UO₂ v zirkoniovém obalu.

5.1.13 RUTA

Ruský projekt teplárny s integrálním PWR o tepelném výkonu 70 MW. Rusko chce pomocí něj zásobovat odlehlé oblasti teplem a snížit tak spotřebu fosilních paliv. Převažují pasivní bezpečnostní systémy a konstrukce se výrazně liší od ostatních PWR. Reaktor je totiž uložen ve vodní nádrži tvaru vysokého komínu, jejíž obsah krom chlazení slouží přímo k přenosu tepla, resp. ohřívání voda je de facto produktem této teplárny.

5.1.14 SHELF

Integrální PWR o výkonu 6 MW_e by měl být podvodním zdrojem energie. Ovládán bude z plovoucí či pobřežní podpůrné stanice. Možné je i třísmýčkové provedení s výkonem 20 MW_e. Reaktor by měl být bezúdržbový s dlouhým palivovým cyklem a jeho předpokládané využití je ve vodách Arktického oceánu při těžbě ropy a plynu.

5.1.15 ELENA

Velice unikátní PWR o výkonu pouhých 68kW_e využívá termoelektrické přeměny v polovodičových termočláncích. Zatím je projektován pouze jako pozemní elektrárna, počítá se však i s možnostmi podzemní a podvodní aplikace. K transportu reaktoru i jeho přidružených systémů by stačila helikoptéra. Reaktor má být naprosto bezobslužný s 300 měsíčním palivovým cyklem. Jedná se zatím pouze o koncept.

5.1.16 mPower

Společnost Babcock & Wilcox vyvinula integrální PWR o výkonu 180 MW_e (při chlazení kondenzátorů vodou) či 155 MW_e (při chlazení kondenzátorů vzduchem). Elektrárna je koncipovaná vždy pro 2 moduly a kromě elektrické energie může sloužit i k produkci technologického tepla. Americká vláda finančně podpořila projekt mPower a očekává spuštění elektrárny s těmito reaktory v lokalitě Clinch River v Tennessee do konce roku 2022.

Specifické bezpečnostní a konstrukční prvky

Reakce je řízena pouze CRDM. Primárním okruhem koluje veliké množství chladiva, což zaručuje nižší teplotu primární vody, a tedy snižuje nároky na nouzové chladicí systémy. Kompenzátor objemu je nahrazen prostorem pod víkem, proto i řídicí tyče neprocházejí víkem, ale jsou uvnitř RPV. Ačkoliv je cirkulace v primárním okruhu nucená a bezpečnostní kombinují aktivní i pasivní prvky, nouzové systémy jsou pasivní. Například nádrž s vodou, do níž je odváděno teplo z kondenzátorů začleněných v PRHRS, a v případě nouze je možné touto vodou zaplavit RPV a reaktor rychle schladit. Reaktor by měl v případě nehody dosáhnout bezpečné teploty i bez zdroje elektrické energie, ale pro jistotu jsou k chlazení připravená i zakonzervovaná, motorem poháněná čerpadla napojená na dieselaagregáty.

Palivo je standardní jako u jiných PWR a délka palivového cyklu je 4 roky. Palivo obohacené na 5 % obsahuje gadoliniové vyhořívající absorbáty. Při výměně paliva je nutné demontovat parogenerátory, a poté se vyměňuje celé jádro reaktoru jako jedna kazeta.

5.1.17 NuScale

Další americký integrální PWR. Jeden až dvanáct reaktorů lze spojit do jedné elektrárny, přičemž výkon každého z nich je přes 45 MW_e a lze je připojovat i postupně k běžící elektrárně, nebo za chodu ostatních vyměnit palivo v některém z nich. Každý reaktor je umístěn ve vlastní RPV, která je uvnitř další tlakové nádoby z vysokopevnostní nerezové oceli, ponořené ve společné nádrži s vodou. Všechny bezpečnostní i nouzové systémy jsou zcela pasivní a cirkulace v primárním okruhu je rovněž přirozená. Stejně jako u mPower je uspořádání palivových tyčí v souboru čtvercové 17 x 17 a obohacení by mělo být do 5 %. Palivový cyklus je 24 měsíců dlouhý a výměna vyžaduje pouze 10 denní odstávku. Pasivní chlazení v případě havárie trvá, díky dvěma PRHRS a nouzovému systému chlazení aktivní zóny, až 30dní a pasivní chlazení okolním vzduchem je i při požadované efektivitě časově neomezené. Technologické prvky mají všechny moduly vlastní, zatímco řídicí technika

i místnost je společná. Díky tomu můžou reaktory pracovat nezávisle na sobě v případě odstavení za účelem údržby některého z nich. V Idaho je plánováno zprovoznění prvního reaktoru NuScale na rok 2023. Po získání licence by výstavba měla trvat pouhých 36 měsíců.

5.1.18 Westinghouse

Tento americký integrální PWR by měl přesahovat výkon 225 MW_e (800 MW_t) a palivový cyklus včetně paliva je téměř shodný s reaktorem NuScale (vyjma počtu palivových souborů). Bezpečnostní systémy jsou téměř všechny pasivní a stejně tak nouzové. PRHRS je dokonce ztrojený, přičemž každý z těchto systému využívá jinou metodu odvodu tepla. Oběh chladiva v primárním okruhu je však nucený. Elektrárna je koncipována pouze na jeden modul s možností kogenerace a čas konstrukce by měl být 18 až 24 měsíců, což je i ve srovnání s jinými SMR velice krátká doba. Dalším společným rysem s americkými reaktory je případné chlazení kondenzátorů vzduchem. To umožňuje stavbu elektráren i v místech s pouze malými vodními zdroji.

5.1.19 SMR-160

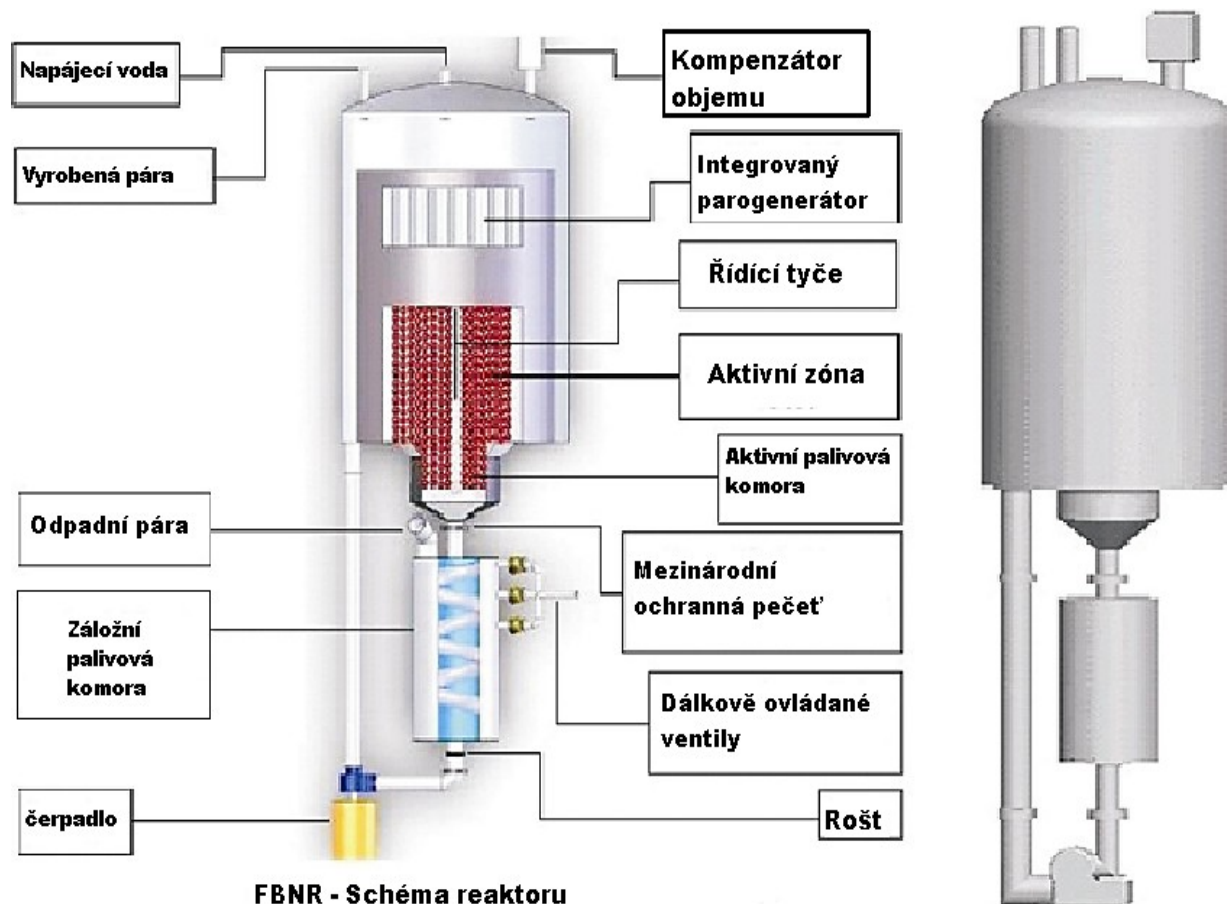
Zcela pod zemí by měla být uložena RPV integrálního PWR o výkonu 160 MW_e , s možností kogenerace tepla pro výrobu vodíku. Velice zjednodušená konstrukce s přirozenou cirkulací v primárním okruhu a pasivními bezpečnostními i nouzovými systémy využívá k chlazení kondenzátorů pouze vzduch. RHRS je pasivní, a doplňují jej dva aktivní systémy. Vyhořelé palivo je rovněž pasivně vzduchem chlazené a to po neomezenou dobu. Velmi unikátní upevnění parogenerátorů umožňuje snadnou výměnu paliva bez nutnosti jejich demontáže. Navíc je palivo uložené v jednotné kazetě a tím pádem se mění jako celý kus. Díky tohoto zjednodušení se doba výměny paliva po 3–4 letém cyklu snížila na pouhých 5 dní. Ve čtvercovém uspořádání se v palivových souborech nachází stejné palivo jako u výše zmíněných PWR, avšak s aktivní délkou téměř 2 x větší (3,7 m). Reakce je regulována pouze CRDM. Životnost je odhadována až na 80 let.

5.1.20 FBNR [8]

Jedná se o brazilský koncept integrálního PWR o výkonu 40 MW_e . Unikátně navržená konstrukce reaktoru pracuje s pasivními bezpečnostními systémy. Cirkulace v primárním okruhu je nucená, jelikož reaktor funguje v podstatě jako fluidní zařízení. Palivo je drženo ve vzhledu v aktivní zóně proudem chladicího média. Jakmile jakékoliv čidlo detekuje problém, nebo dojde k výpadku elektřiny, čerpadlo se zastaví a palivo spadne do nouzové

palivové komory. Ta je pasivně chlazená a obalem je neutrony vysoce absorbující hliník, jehož cílem je zpomalení až zastavení reakce. Co dva roky se celá palivová komora odpojí a je odvezena do továrny k výměně paliva.

Obrázek 5: Schéma reaktoru FBNR



Zdroj: http://www.sefidvash.net/fbnr/images/fbnr_structure.jpg

5.2 Těžkou vodou moderované SMR

V této kapitole je přehled a popis reaktorů, které využívají jako moderátor těžkou vodu, tedy těžkovodní reaktory (HWR – Heavy Water Reactor). Reaktory jsou buď varné chlazené lehkou vodou (HWLWR – Heavy Water Moderated Boiling Light Water Cooled Reactor), nebo tlakovodní chlazené těžkou vodou (PHWR – Pressurized Heavy Water Reactor) nebo plyným CO_2 (HWGCR – Heavy Water Gas Cooled Reactor).

5.2.1 AHWR300-LEU

Tento indický HWLWR disponuje výkonem 300 MW_e (920 MW_t). Primárně je navržen k produkci elektřiny. Ve výzkumném atomovém centru Bhabha vznikl tento projekt v rámci přeměny politiky jaderné energetiky v Indii. Indie počítá s obrovským znásobením elektrického výkonu pomocí jaderných elektráren. Kvůli malým zásobám uranu je však nucena palivo dovážet, a kvůli rychlé potřebě elektrické energie nakupuje i lehkovodní reaktory. V dlouhodobém horizontu se však chce osamostatnit a budoucnost hledá ve využití těžkovodních reaktorů s palivem v podobě obohaceného thoria v kombinaci s rychlými množivými reaktory. Ložisek thoria má Indie velké množství a tento reaktor by měl být v Indii průkopníkem jaderných elektráren využívajících obohacené thorium. Projekt klade veliký důraz na dlouhou životnost (ta by měla dosahovat 100 let) a vysokou bezpečnost.

Specifické konstrukční a bezpečnostní prvky

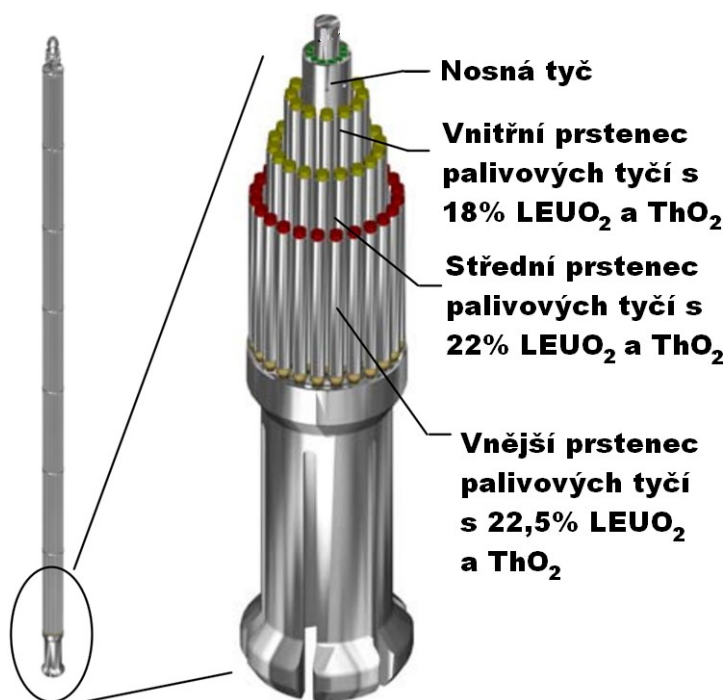
V RPV je těžká voda jako moderátor a ve vertikálně orientovaných kanálech primárního okruhu je lehká voda. Po vypaření jde do separátoru v podobě parního válce, a zatímco pára pokračuje do turbíny, do parního válce je vstříknuta chladnější napájecí voda mezi dva usměrňovače a smísí se s nasycenou vodou. Po smíšení voda stéká do sběrače a přes svodové trubky zpět na vstup do reaktoru.

V případě poruchy hlavních kondenzátorů jde pára do nouzových kondenzátorů umístěných uvnitř $8\,000 \text{ m}^3$ veliké nádrže zcela zaplněné vodou. Očekává se, že tato nádrž zajistí pasivní odvod zbytkového tepla po dobu více než 110 dnů. Systém chlazení jádra reaktoru je rovněž pasivní, a to jak za chodu, tak v případě poruchy, stejně jako vstřikování chladiva v případě jeho ztráty. Automatické systémy zastavení reaktoru jsou v případě výpadku zastoupeny pasivním systémem používajícím k injektáži moderátoru tlak páry. Dále bezpečnost zajišťují další dva pasivní systémy sloužící k chlazení kontejnmentu a částí reaktorové budovy, které jsou vystaveny vysokým teplotám. Kromě všech pasivních systému zajišťujících bezpečnost

v době případných poruch, se o spolehlivý chod celé elektrárny, monitoring a kontrolu všech systémů mají starat vysoce výkonné počítačové systémy s vlastním záložním zdrojem energie.

Charakteristika paliva a palivového cyklu

Aktivní zóna reaktoru je zaplněna 444 palivovými soubory s průměrným obsahem 4,3 % izotopu ^{235}U . Palivový soubor obsahuje 54 tyčí z ThO_2 uspořádaných v Zircalloy-2 obalu do tří soustředných kruhů. V jednom je 12 tyčí s 30 % LEU (Low Enriched Uranium), v druhém 18 s 24 % LEU a ve třetím, vnějším, jich je 24 s 16 % LEU. Obohacení izotopem ^{235}U je průměrně 4,3 %. Aktivní délka palivových článků je 3,5 m. K výměně paliva není nutné odstavovat reaktor. Délka palivového cyklu nebyla v žádném zdroji uvedena.



Obrázek 6: Palivový soubor AHWR300-LEU
zdroj: http://dae.nic.in/writereaddata/.pdf_31

5.2.2 PHWR-220

Indický PWHR vyrábějící elektrickou energii s výkonem 220–236 MW_e je v provozu v Indii od roku 1981. Palivem je přírodní UO_2 a palivový cyklus je dvouletý. Rychlost reakce je ovládána řídicími tyčemi a přídavnými absorbáty v moderátoru. Možnost zvýšení výkonu použitím jiného paliva (lehce obohacený uran, MOX, etc.) se ještě zkoumá. Konstrukce je integrální, včetně parního bubnu pod víkem RPV. Primární voda je hnána velkým oběhovým čerpadlem a i novější verze tohoto reaktoru využívají kromě pasivních i aktivní bezpečnostní a nouzové systémy. Systém nouzového odstavení reaktoru je dokonce ztrojený.

5.3 Reaktory IV. Generace [18]

Ačkoliv se jedná rovněž o modulární reaktory, používané technologie jsou různé od těch ve výše zmíněných reaktorech, a tudíž se řadí do generace IV. Výhodou těchto reaktorů je mnohem vyšší teplota pracovního média (cca 500 až 1000 °C) což kromě vyšší účinnosti poskytuje i možnost produkce technologického tepla pro vysokoteplotní procesy. Rychlé množivé reaktory navíc dokáží využít chemický potenciál dosud nevyužitých složek jaderného paliva a velmi vhodné by tedy měly být v kombinaci s nyní používanými tepelnými reaktory. První aplikace těchto reaktorů je očekávána nejdříve v roce 2030. Jedná se v drtivé většině o rychlé množivé reaktory s dosud komerčně nepoužívanými technologiemi. Celý vývoj monitoruje, kontroluje a koriguje program GIF (Generation IV International Forum) vzniknuvší na popud ministerstva energetiky USA v roce 1999. Kromě univerzit a specializovaných národních laboratoří se do programu zapojilo 10 zemí. Fórum seskupuje koncepty reaktorů a snaží se vybrat několik typů reaktorů, které budou budoucností jaderné energetiky. Kritéria, která musí tyto reaktory splňovat, jsou: ekonomická konkurenceschopnost, vysoká úroveň bezpečnosti, stabilita provozu, zvýšení účinnosti oproti stávajícím reaktorům (ať už zvýšení stupně využití jaderného paliva, nebo zvýšení účinnosti tepelného oběhu). GIF rozdělil reaktorové systémy následovně:

- Plynem chlazený rychlý reaktorový systém – GFR
(Gas-Cooled Fast Reactor System)
- Olovem chlazený rychlý reaktorový systém – LFR
(Lead-Cooled Fast Reactor System)
- Sodíkem chlazený rychlý reaktorový systém – SFR
(Sodium-Cooled Fast Reactor System)
- Reaktorový systém s roztavenými solemi – MSR
(Molten Salt Reactor System)
- Superkritický vodou chlazený reaktorový systém – SCWR
(Supercritical-Water-Cooled Reactor System)
- Vysokoteplotní reaktorový systém – VHTR
(Very High Temperature Reactor System)

6 Návrh parogenerátorového článku [4]

Tato kapitola obsahuje ideový návrh a návrh rozměrů článku parogenerátoru pro modulární tlakovodní jadernou teplárnu s tepelným výkonem 229 MW_t. Volba parogenerátoru byla provedena po pečlivém nastudování posudků brněnských strojíren [4], týkajících se aplikace parogenerátorů pro jaderné elektrárny typu VVER-440. Ve zmiňovaných materiálech se vybírali mezi horizontálními tělesovými parogenerátory a článkovými parogenerátory různých rozměrů. Vzhledem k malému výkonu zadané teplárny a modulárnosti stavby se jako nejvhodnější možnost z hlediska konstrukčního jevílo zvolit parogenerátor článkový. Zvolil jsem parogenerátor typu L Ø457 jelikož při počtu 6 článků v jedné smyčce jeho výkon odpovídal výkonu, který je nutno dosáhnout i v zadané jaderné teplárně. Podrobněji se o tomto parogenerátoru zmíním v následující podkapitole (6.1). Návrh rozměrů vychází z tepelného výpočtu realizovaného v kapitole (6.2).

6.1 Charakteristika parogenerátoru [4]

Pracovní teplosměnná část parogenerátoru je tvořena šesti L-články v jedné smyčce uspořádanými tak, že roviny, v nichž články leží, jsou rovnoběžné (články jsou v zákrytu). Horká primární voda z reaktoru je hnána čerpadlem do horního kolektoru. Shora vstupuje do vertikálně postavených trubek a klesá dolů svisle výparnou částí parogenerátoru. Na konci výparného úseku přechází článek parogenerátoru plynule do části dohřívací, která je již ohnutá tak, aby vstup a výstup do této části byl pod úhlem 90°, což nezpříčiní výrazný rozdíl v délce teplosměnných trubek. Odtud je napojena na spodní sběrný kolektor a je hnána zpět do reaktoru. Celý oběh je podporován přirozenými fyzikálními jevy, a tudíž se v menší míře oběh zachovává i při výpadku čerpadla. Trubky uvnitř parogenerátoru jsou z jednoho kusu a rovnoběžné s pláštěm parogenerátoru. Plášť je svařenec vzniklý svařením svislé části pláště a kolena, jež tvoří dohřívací úsek. Rozměry těchto částí budou spočteny v podkapitole (6.2). Zespod do dohřívacího úseku vstupuje v mezitrubkovém prostoru směs napájecí vody a syté vody z bubnu. Dohřívací část by měla být dimenzovaná tak, aby na jejím konci byla tato směs opět sytou kapalinou. Ve výparném úseku se odpařuje pára, a parovodní směs pokračuje do bubnu, který je společný pro všechny smyčky. Uvnitř bubnu jsou umístěny separační vestavby, jež oddělují z parovodní směsi páru a ta v nejvyšším bodě odchází ústím do kolektoru, odkud postupuje dále na turbínu. Toto provedení bubnu je známo již z klasické energetiky, a tudíž je tento mechanismus odzkoušený, což je pozitivní zprávou pro bezpečnostní i ekonomická hlediska. Oddělená sytá voda se pak v zavodňovacích

trubkách mísí s vodou napájecí a jde opět do dohřívací části. Vypouštět a odkalovat lze jednotlivé L-články pomocí ventilu na spodní části článků.

6.2 Tepelný výpočet [2, 3, 6]

Cílem této kapitoly je skrze vypočtené hodnoty navrhnout rozměry zvoleného parogenerátoru. Návrh se týká délky parogenerátorového článku, resp. délek jeho jednotlivých částí. Přitom je nutné počítat s poškozením výměňkových trubek. Časem bude nutné poškozené trubky zaslepovat, a tudíž v rámci prevence snížení teplosměnné plochy volím délkovou rezervu $18 \div 22$ %. Dle literatury a názoru technických odborníků znalých problematiky by měla být tato rezerva adekvátní. Ačkoliv se jedná o parogenerátor typu L, pro tento výpočet zanedbávající hydraulické aspekty (proudění je považováno za kontinuální beze ztrát) postačí uvažovat celý parogenerátor za rovný, aniž by byl výsledek ovlivněn.

Tab. 3.: Základní parametry tepelného oběhu a parogenerátoru

Tepelný výkon parogenerátoru	Q_c	229	MW_t
Parní výkon	m_{pc}	94,43	$kg \cdot s^{-1}$
Teplota primární vody	t_{l1}/t_{l2}	301/268	$^{\circ}C$
Tlak primární vody	p_I	12,5	MPa
Teplota napájecí vody	t_{nv}	223	$^{\circ}C$
Teplota syté páry	t_p	259	$^{\circ}C$
Tlak syté páry	p_p	4,7	MPa
Počet cirkulačních smyček	n_s	1	-
Počet článků v jedné smyčce	n_{ξ}	6	-
Cirkulační číslo	c	7,4	-
Rozměr pláště jednoho článku	D_{pl}/d_{pl}	0,457/0,429	m
Počet trubek v jednom článku	n_{tr}	580	-
Rozměry trubek $\varnothing 16 \times 1,4$	D_{tr}/d_{tr}	0,016/0,0132	m

Zdroj: vlastní zpracování dle zadání BP a [4]

Tab. 4. Doplnění hodnot potřebných k výpočtu pomocí tabulek [1, 5, 15]

Entalpie primární vody	i_l	1349,7/1174,5	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Hustota primární vody	ρ_{l1}/ρ_{l2}	712,5/769,7	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Entalpie napájecí vody	i_{nv}	957,4	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Entalpie syté páry	i_p	2796,5	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Hustota syté páry	ρ_p	23,52	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Entalpie syté vody	i_{sv}	1129,85	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Hustota syté vody	ρ_{sv}	784,0	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Tepelná vodivost chrom. martenzitické nerezové oceli 13Cr při teplotách 0 a 500 °C	λ_{no0} λ_{no500}	21,2 23,6	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Zdroj: vlastní zpracování

6.2.1 Výkonové charakteristiky a hmotnostní toky

- Výkon přenášený jedním článkem parogenerátoru

$$Q_{\check{c}} = \frac{Q_c}{n_s \cdot n_{\check{c}}} \quad (1)$$

$$Q_{\check{c}} = \frac{229}{1 \cdot 6} = 38,2 \text{ MW}_t$$

- Hmotnostní průtok primární vody jedním článkem parogenerátoru

$$m_l = \frac{Q_{\check{c}}}{\Delta i_l} = \frac{Q_{\check{c}}}{i_{l1} - i_{l2}} \quad (2)$$

$$m_l = \frac{38,2 \cdot 10^6}{(1349,7 - 1174,5)} = 186,2 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

- Množství páry vyrobené jedním článkem parogenerátoru

$$m_p = \frac{m_{pc}}{n_s \cdot n_{\check{c}}} \quad (3)$$

$$m_p = \frac{94,43}{1 \cdot 6} = 15,74 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

- Množství napájecí vody přitékající do jednoho článku parogenerátoru

$$m_{nv} = m_p = 15,74 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

- Množství podchlazené kapaliny vstupující do článku – v zavodňovací trubce (napájecí vody z potrubí napájecí vody i syté vody proudící z bubny)

$$m_{pk} = c \cdot m_p \quad (4)$$

$$m_{pk} = 7,44 \cdot 15,74 = 117,11 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

- Entalpie podchlazené kapaliny v zavodňovací trubce

$$i_{pk} = \frac{m_{nv} \cdot i_{nv} + (m_{pk} - m_{nv}) \cdot i_{sv}}{m_{pk}} \quad (5)$$

$$i_{pk} = \frac{15,74 \cdot 957,4 + (117,11 - 15,74) \cdot 1129,85}{117,11} = 1106,67 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

- Z vypočtené entalpie pomocí tabulek [5], [14] určíme teplotu a hustotu podchlazené kapaliny

$$t_{pk} = 254,37 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\rho_{pk} = 793,7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

- Přírůstek entalpie dohřátím podchlazené kapaliny na mez sytosti

$$\Delta i_d = i_{sv} - i_{pk} \quad (6)$$

$$\Delta i_d = 1129,85 - 1106,67 = 23,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

- Dohřívací výkon

$$Q_d = m_{pk} \cdot \Delta i_d \quad (7)$$

$$Q_d = 117,11 \cdot 23,18 = 2714,6 \text{ kW}$$

- Výkon výparné části

$$Q_v = Q_{\xi} - Q_d \quad (8)$$

$$Q_v = 38,2 \cdot 10^6 - 2714,6 \cdot 10^3 = 35485,4 \text{ kW}$$

6.2.2 Průtočné plochy a rychlost médií v jednotlivých úsecích

- Průtočná plocha na straně primární vody (uvnitř trubek)

$$S_I = \frac{\pi \cdot d_{tr}^2}{4} \cdot n_{tr} \quad (9)$$

$$S_I = \frac{\pi \cdot 0,0132^2}{4} \cdot 580 = 0,07937 \text{ m}^2$$

- Entalpie primární vody na vstupu do dohřívacího úseku (ze strany sekundárního okruhu výstupu z dohřívacího úseku)

$$i_{ID} = i_{I2} + \frac{Q_d}{m_I} \quad (10)$$

$$i_{ID} = 1174,5 + \frac{2714,6}{186,2} = 1187,5 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

- Z vypočtené entalpie pomocí tabulek [5, 14] určíme teplotu a hustotu primární vody na vstupu do dohřívacího úseku (ze strany sekundárního okruhu výstupu z dohřívacího úseku)

$$t_{ID} = 270,57 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\rho_{ID} = 767,8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

- Střední hustota primární vody v dohřívacím úseku

$$\rho_{Ids} = \frac{\rho_{ID} + \rho_{I2}}{2} \quad (11)$$

$$\rho_{Ids} = \frac{767,8 + 769,7}{2} = 768,75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

- Střední rychlost primární vody v dohřívacím úseku

$$w_{Ids} = \frac{m_I}{S_I \cdot \rho_{Ids}} \quad (12)$$

$$w_{Ids} = \frac{186,2}{0,07937 \cdot 768,75} = 3,05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

- Střední hustota primární vody ve výparném úseku

$$\rho_{Ivs} = \frac{\rho_{ID} + \rho_{I1}}{2} \quad (13)$$

$$\rho_{Ivs} = \frac{767,8 + 712,5}{2} = 740,15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

- Střední rychlost primární vody ve výparném úseku

$$w_{Ivs} = \frac{m_I}{S_I \cdot \rho_{Ivs}} \quad (14)$$

$$w_{Ivs} = \frac{186,2}{0,07937 \cdot 740,15} = 3,17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

- Ekvivalentní průměr pláště parogenerátorového článku

$$D_e = D_1 = 0,429 \text{ m}$$

- Průtočná plocha na straně sekundární vody (mezitrubkový prostor)

$$S_{II} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_e^2 - D_{tr}^2 \cdot n_{tr}) \quad (15)$$

$$S_{II} = \frac{\pi}{4} \cdot (0,429^2 - 0,016^2 \cdot 580) = 0,02793 \text{ m}^2$$

- Omočený obvod na sekundární straně

$$o_{II} = \pi \cdot (D_e + D_{tr} \cdot n_{tr}) \quad (16)$$

$$o_{II} = \pi \cdot (0,429 + 0,016 \cdot 580) = 30,502 \text{ m}$$

- Hydraulický průměr

$$d_{hII} = 4 \cdot \frac{S_{II}}{o_{II}} \quad (17)$$

$$d_{hII} = 4 \cdot \frac{0,02793}{30,502} = 0,00366 \text{ m}$$

- Střední hustota sekundární vody v dohřívacím úseku

$$\rho_{II ds} = \frac{\rho_{pk} + \rho_{sv}}{2} \quad (18)$$

$$\rho_{II ds} = \frac{793,7 + 784,0}{2} = 788,85 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

- Střední rychlost sekundární vody v dohřívacím úseku

$$w_{II ds} = \frac{m_{pk}}{S_{II} \cdot \rho_{II ds}} \quad (19)$$

$$w_{II ds} = \frac{117,11}{0,02793 \cdot 788,85} = 5,32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

- Střední rychlost sekundární vody ve výparném úseku

$$w_{Iivs} = \frac{m_{pk}}{S_{II} \cdot \rho_{sv}} \quad (20)$$

$$w_{Iivs} = \frac{117,11}{0,02793 \cdot 784,0} = 5,35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

6.2.3 Součinitel prostupu tepla v dohřívacím úseku

- Střední teplota na straně primární vody v dohřívacím úseku

$$t_{Ids} = \frac{t_{I2} + t_{ID}}{2} \quad (21)$$

$$t_{Ids} = \frac{268 + 270,6}{2} = 269,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

- Z vypočtené střední teploty primární vody v dohřívacím úseku určí pomocí tabulek [5, 19] hodnoty charakteristických veličin

Součinitel tepelné vodivosti: $\lambda_{Id} = 0,608 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Kinematická viskozita: $\vartheta_{Id} = 1,284 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Prandtlovo číslo: $Pr_{Id} = 0,819$

- Reynoldsovo číslo na straně primární vody v dohřívacím úseku

$$Re_{Id} = \frac{w_{Ids} \cdot d_{tr}}{\vartheta_{Id}} \quad (22)$$

$$Re_{Id} = \frac{3,05 \cdot 0,0132}{1,284 \cdot 10^{-7}} = 313551$$

- Nuseltovo číslo: pro turbulentní proudění v trubkách s $Re > 10^4$ a $Pr > 0,7$ platí Dittus-Boeltrova rovnice

$$Nu_{Id} = 0,023 \cdot Re_{Id}^{0,8} \cdot Pr_{Id}^{0,4} \quad (23)$$

$$Nu_{Id} = 0,023 \cdot 313551^{0,8} \cdot 0,819^{0,4} = 529,8$$

- Součinitel přestupu tepla na straně primární vody v dohřívacím úseku

$$\alpha_{Id} = Nu_{Id} \cdot \frac{\lambda_{Id}}{d_{tr}} \quad (24)$$

$$\alpha_{Id} = 529,8 \cdot \frac{0,608}{0,0132} = 24402 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

- Střední teplota na straně sekundární vody v dohřívacím úseku

$$t_{IIdS} = \frac{t_{pk} + t_{sv}}{2} \quad (25)$$

$$t_{IIdS} = \frac{254,4 + 259}{2} = 256,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Z vypočtené střední teploty sekundární vody v dohřívacím úseku určí pomocí tabulek [5, 19] hodnoty charakteristických veličin

$$\text{Součinitel tepelné vodivosti: } \lambda_{IId} = 0,614 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\text{Kinematická viskozita: } \vartheta_{IId} = 1,305 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{Prandtlovo číslo: } Pr_{IId} = 0,831$$

- Reynoldsovo číslo na straně sekundární vody v dohřívacím úseku

$$Re_{IId} = \frac{w_{IIdS} \cdot d_{hII}}{\vartheta_{IId}} \quad (26)$$

$$Re_{II d} = \frac{5,32 \cdot 0,00366}{1,305 \cdot 10^{-7}} = 149205$$

- Nuseltovo číslo: pro turbulentní obtékání svazku trubek s přesazeným uložením a hodnotou Re v rozmezí 10^3 až $2 \cdot 10^5$ platí rovnice

$$Nu_{II d} = c \cdot Re_{II d}^n \cdot Pr_{II d}^{0,33} \cdot \varepsilon_i \cdot \varepsilon_s \quad (27)$$

$$Nu_{II d} = 0,41 \cdot 149205^{0,6} \cdot 0,831^{0,33} \cdot 0,42 \cdot 1,12 = 230,7$$

kde: c, n koeficienty závislé na uspořádání trubek (střídavé – $c=0,41$; $n=0,6$)

ε_i součinitel vlivu náběhu proudu na svazek trubek

$$\varepsilon_i = 0,6 \text{ (1. řada)}$$

$$\varepsilon_i = 0,7 \text{ (2. řada)}$$

ε_s součinitel vlivu roztečí

$$\varepsilon_s = 1,12$$

- Součinitel přestupu tepla na straně sekundární vody v dohřívacím úseku

$$\alpha_{II d} = Nu_{II d} \cdot \frac{\lambda_{II d}}{d_{hII}} \quad (28)$$

$$\alpha_{II d} = 230,7 \cdot \frac{0,614}{0,00366} = 38702,13 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

- Střední teplota stěny trubek v dohřívacím úseku

$$t_{trds} = \frac{t_{II ds} + t_{I ds}}{2} \quad (29)$$

$$t_{trds} = \frac{256,7 + 269,3}{2} = 263 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Z tabulek v příloze literatury [1] určím součinitel tepelné vodivosti chromové martenzitické nerezové oceli při teplotě t_{trds}

$$\lambda_{trds} = 22,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

- Výsledný součinitel prostupu tepla v dohřívacím úseku

$$k_d = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_{Id} \cdot d_{tr}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{trds}} \cdot \ln \frac{D_{tr}}{d_{tr}} + \frac{1}{\alpha_{IId} \cdot D_{tr}}} \quad (30)$$

$$k_d = \frac{\pi}{\frac{1}{24402 \cdot 0,0132} + \frac{1}{2 \cdot 22,3} \cdot \ln \frac{0,016}{0,0132} + \frac{1}{24208 \cdot 0,016}}$$

$$k_d = 314,17 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

6.2.4 Součinitel prostupu tepla ve výparném úseku

- Střední teplota na straně primární vody ve výparném úseku

$$t_{Ivs} = \frac{t_{I1} + t_{ID}}{2} \quad (31)$$

$$t_{Ivs} = \frac{301 + 270,6}{2} = 285,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Z vypočtené střední teploty primární vody ve výparném úseku určí pomocí tabulek [5, 19] hodnoty charakteristických veličin

Součinitel tepelné vodivosti: $\lambda_{Iv} = 0,582 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Kinematická viskozita: $\vartheta_{Iv} = 1,243 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Prandtlovo číslo: $Pr_{Iv} = 0,837$

- Reynoldsovo číslo na straně primární vody ve výparném úseku

$$Re_{Iv} = \frac{w_{Ivs} \cdot d_{tr}}{\vartheta_{Iv}} \quad (32)$$

$$Re_{lv} = \frac{3,17 \cdot 0,0132}{1,243 \cdot 10^{-7}} = 336637$$

- Nuseltovo číslo: pro turbulentní proudění v trubkách s $Re > 10^4$ a $Pr > 0,7$ platí Dittus-Boeltrova rovnice

$$Nu_{lv} = 0,023 \cdot Re_{lv}^{0,8} \cdot Pr_{lv}^{0,4} \quad (33)$$

$$Nu_{lv} = 0,023 \cdot 336637^{0,8} \cdot 0,837^{0,4} = 565,6$$

- Součinitel přestupu tepla na straně primární vody ve výparném úseku

$$\alpha_{lv} = Nu_{lv} \cdot \frac{\lambda_{lv}}{d_{tr}} \quad (34)$$

$$\alpha_{lv} = 565,6 \cdot \frac{0,582}{0,0132} = 24937,82 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

- Střední teplota na straně sekundární vody ve výparném úseku

$$t_{llvs} = t_{sv} = 259 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Součinitel přestupu tepla na straně sekundární vody ve výparném úseku (pro přestup tepla při změně skupenství – var)

$$\alpha_{llv} = \frac{10,45}{3,3 - 0,0113 \cdot (t_s - 100)} \cdot q_{vo}^{0,7} \quad (35)$$

$$\alpha_{llv} = \frac{10,45}{3,3 + 0,0113 \cdot (259 - 100)} \cdot 175000^{0,7} = 32523,50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde: t_s teplota stěny na straně sekundární vody, limitně se blíží 259 °C

q_{vo} odhadovaný střední tepelný tok stěnou ve výparném úseku, volím
175 000 W·m⁻²

- Střední teplota stěny trubek ve výparném úseku

$$t_{trvs} = \frac{t_{lvs} + t_{ivs}}{2} \quad (36)$$

$$t_{trvs} = \frac{259 + 285,8}{2} = 272,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Z tabulek v příloze literatury [1] určím součinitel tepelné vodivosti chromové martenzitické nerezové oceli při teplotě t_{trvs}

$$\lambda_{trvs} = 22,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

- Výsledný součinitel prostupu tepla ve výparném úseku

$$k_v = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_{lv} \cdot d_{tr}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{trvs}} \cdot \ln \frac{D_{tr}}{d_{tr}} + \frac{1}{\alpha_{lv} \cdot D_{tr}}} \quad (37)$$

$$k_v = \frac{\pi}{\frac{1}{24938 \cdot 0,0132} + \frac{1}{2 \cdot 22,4} \cdot \ln \frac{0,016}{0,0132} + \frac{1}{32523,50 \cdot 0,016}}$$

$$k_v = 339,50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

6.2.5 Střední logaritmické teplotní spády a celková délka trubek

- Rozdíly teplot na vstupu a výstupu z výparného úseku

Vstup:

$$\Delta t_1 = t_{ld} - t_{sv} \quad (38)$$

$$\Delta t_1 = 270,6 - 259 = 21,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Výstup:

$$\Delta t_3 = t_{I1} - t_{sv} \quad (39)$$

$$\Delta t_3 = 301 - 259 = 42 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Střední logaritmický spád ve výparném úseku

$$\Delta t_v = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_3}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_3}} \quad (40)$$

$$\Delta t_v = \frac{21,6 - 42}{\ln \frac{21,6}{42}} = 30,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Délka teplosměnné plochy výparného úseku

$$L_v = \frac{Q_v}{\Delta t_v \cdot k_v} \quad (41)$$

$$L_v = \frac{35485,4 \cdot 10^3}{30,7 \cdot 339,50} = 3404,6 \text{ m}$$

- Potřebná délka výparného úseku trubek

$$l_v = \frac{L_v}{n_{tr}} \quad (42)$$

$$l_v = \frac{3404,6}{580} = 5,87 \text{ m}$$

- Měrný tepelný tok stěnou výparného úseku

$$q_v = \frac{Q_v}{\pi \cdot D_{tr} \cdot L_v} \quad (43)$$

$$q_v = \frac{35485,4 \cdot 10^3}{\pi \cdot 0,016 \cdot 3404,6} = 207353,08 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

- Odchylka od odhadovaného tepelného toku

$$s = \frac{q_v - q_{vo}}{q_{vo}} \cdot 100 \quad (44)$$

$$s = \frac{207353,08 - 196514,68}{196514,68} \cdot 100 = 5,6 \%$$

Výpočet je v této fázi nepřesný, pročež volím iterační metodu výpočtu za účelem přiblížení se reálnému výsledku. Výsledný střední tepelný tok dosadím za střední tepelný tok odhadovaný, a výpočet provedu znovu. K tomuto účelu použiji program Microsoft Excel 2010. Celý cyklus budu provádět, dokud hodnota odchylky neklesne pod 0,05 %. Postupné výsledky veličin měnících se s výpočtem budou zapsány v tabulce (5) umístěné níže.

Tab. 5.: Postup iteračního výpočtu

$q_{vo} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$	$\alpha_{lv} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$	$k_v [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$	$L_v/l_v [\text{m}]$	$q_v [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$	$s [\%]$
175000,00	32523,50	339,50	3404,6/5,87	207353,08	15,6
207353,08	36624,19	347,58	3325,5/5,73	212289,27	2,33
212289,27	37232,33	348,66	3315,2/5,72	212945,99	0,31
212945,99	37312,92	348,80	3313,9/5,71	213031,70	0,04

V posledním výpočtu již dosáhla hodnota odchylky pouhých 0,04 %. Důležité hodnoty se již téměř neměnily (hodnota délky trubek ve výparné části se měnila až v řádu desetitisícin), a tudíž lze přesnost výpočtu považovat za dostatečnou. Důležitou výstupní hodnotou tohoto výpočtu je délka trubek ve výparné části ($l_v = 5,71 \text{ m}$).

- Rozdíly teplot na vstupu a výstupu z dohřívacího úseku

Vstup:

$$\Delta t_2 = t_{I2} - t_{pk} \quad (45)$$

$$\Delta t_2 = 268 - 254,4 = 13,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Výstup:

$$\Delta t_1 = t_{Id} - t_{sv} \quad (46)$$

$$\Delta t_1 = 270,6 - 259 = 21,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Střední logaritmický spád v dohřívacím úseku

$$\Delta t_d = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}} \quad (47)$$

$$\Delta t_d = \frac{13,6 - 21,6}{\ln \frac{13,6}{21,6}} = 17,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Délka teplosměnné plochy dohřívacího úseku

$$L_d = \frac{Q_d}{\Delta t_d \cdot k_d} \quad (48)$$

$$L_d = \frac{2714,6 \cdot 10^3}{17,3 \cdot 348,8} = 449,9 \text{ m}$$

- Potřebná délka dohřívacího úseku trubek

$$l_d = \frac{L_d}{n_{tr}} \quad (49)$$

$$l_d = \frac{449,6}{580} = 0,78 \text{ m}$$

- Celková teoretická délka trubek ve výměníku

$$l_{ct} = l_v + l_d \quad (50)$$

$$l_{ct} = 5,71 + 0,78 = 6,49 \text{ m}$$

- Celková skutečná délka trubek ve výměníku

Z důvodů zmíněných na začátku kapitoly (6) volím délkovou rezervu $r = 18 \div 22 \%$.

$$l_{tr} = l_{ct} \cdot (1 + r) \quad (51)$$

$$l_{tr1} = l_{ct} \cdot (1 + 0,18) = 6,49 \cdot 1,18 = 7,66 \text{ m}$$

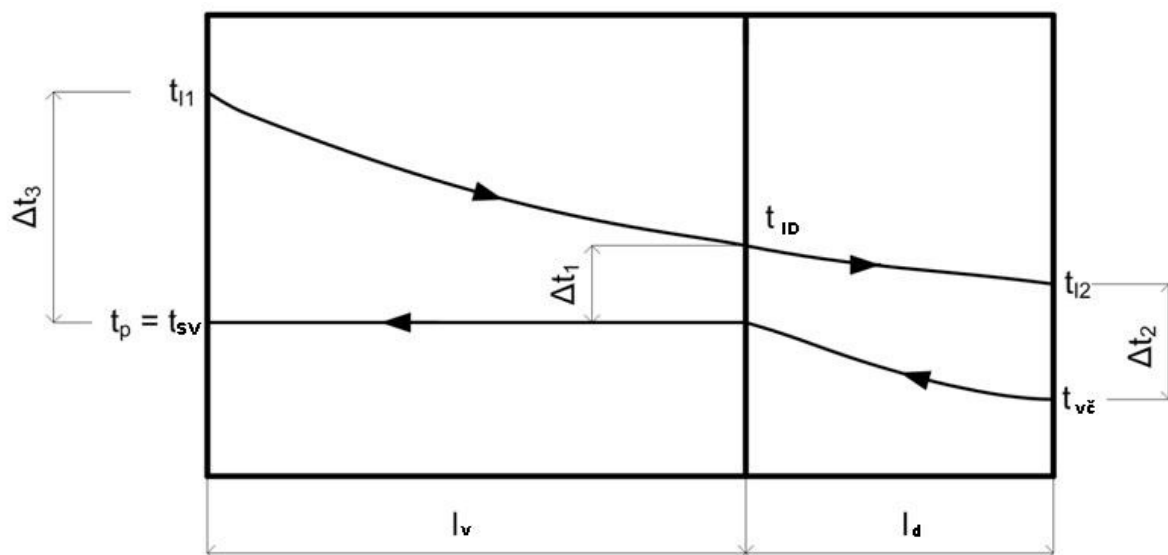
$$l_{tr2} = l_{ct} \cdot (1 + 0,22) = 6,49 \cdot 1,22 = 7,92 \text{ m}$$

Volím $l_{tr} = 7,8 \text{ m}$.

6.2.6 Průběh teplot v parogenerátoru

Následující graf zobrazuje průběh teplot primárního a sekundárního média při průtoku parogenerátorem.

Obrázek 7: Průběh teplot v parogenerátoru



Zdroj: vlastní zpracování

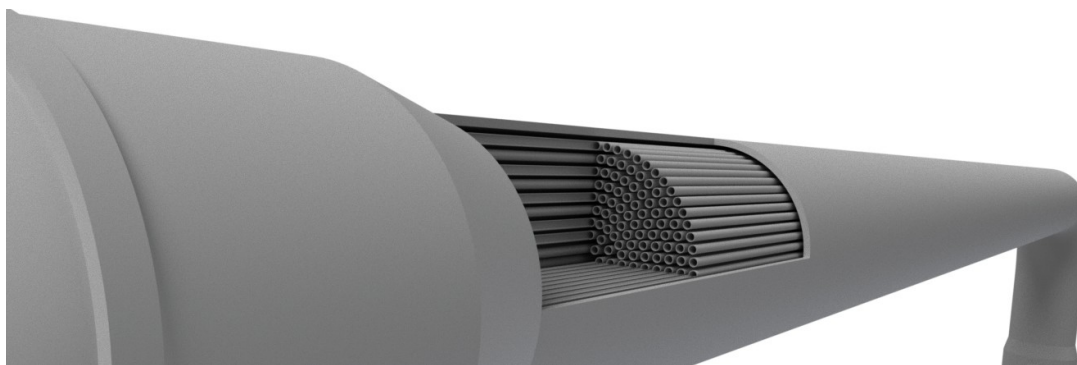


Na obázku (8) je zjednodušený model jedné ze šesti smyček člankového parogenerátoru.

1. Parogenerátorový článek
2. Vstup primární vody do článku
3. Výstup primární vody z článku
4. Vstup podchlazené kapaliny (směsi napájecí vody se sytou vodou z bubnu) do článku
5. Výstup parovodní směsi z článku
6. Buben s parovodní směsí a integrovanými separačními vestavbami – buben je válcový s půlkulovými čely a je společný pro všechny smyčky
7. Výstup syté páry z bubnu

Obrázek 8: Model smyčky parogenerátoru

Zdroj: vlastní zpracování



Obrázek 9: Řez částí parogenerátorového článku

Zdroj: vlastní zpracování

7 Závěr

Při výpočtu se neukázaly žádné anomálie, které by vedly k zásahům do konstrukce parogenerátoru. Vzhledem k nevelkým rozdílům teplot primárního a sekundárního média vyšly součinitele přestupu tepla podobné, takže není třeba speciálních úprav povrchu či žebrování. Výsledné součinitele prostupu tepla navíc vyšly dostatečně velké, aby parogenerátor přenesl požadované množství tepla mezi médii na rozumně dlouhém úseku. Nerezový materiál, z něhož jsou trubky vyrobeny, splňuje požadavek na dobrou tepelnou vodivost, aniž by cenově výrazně přesahoval jiné nerezové materiály. Z hlediska konstrukčního pak považují volbu článkového parogenerátoru za vhodnou, jelikož nikterak nekoliduje s myšlenkou modulárnosti uvažované jaderné teplárny. Oproti velkým tělesovým parogenerátorům je článkový parogenerátor méně náročný na výrobní technologie a snáze odolává větším tlakům. Při délce osy parogenerátoru 7,8m nepřesáhne celková výška 10m. Tento rozměr s dostatečnou rezervou vyhovuje dispozicím parogenerátorových boxů v uvažované jaderné teplárně. Zvolený parogenerátor tedy i po rozměrové stránce považují za vhodný. Menší rozměry jsou výhodné rovněž z ekonomických hledisek, jak pro následné testování parogenerátoru, tak i v souvislosti s výrobními náklady, náklady na přepravu a montáž samotného parogenerátoru přímo v místě teplárny.

8 Seznam použité literatury

- [1] KADLEC, Zdeněk. *Termomechanika: návody do cvičení*. 2. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008, 97 s. ISBN 978-80-248-1736-1.
- [2] BLAHOŽ, Vladimír a Zdeněk KADLEC. *Základy sdílení tepla*. 1. vyd. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 1996, 109 s. Spektrum (Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství). ISBN 80-902001-1-7.
- [3] Kolat, P.: *Přenos tepla a hmoty*. Ostrava. 1986.
- [4] Kubáček, A.: *Zhodnocení parogenerátorů s články typu L Ø 900 pro jaderné elektrárny VVER 440 MWe*. První brněnská strojírna Brno. 1973. ONT-ZZ-77-73.
- [5] Ražnjevič, K.: *Termodynamické tabulky*. Zagreb. 1975.
- [6] Stehlík, P. a kol.: *Tepelné pochody, výpočet výměníku tepla*. VUT Brno. 1991. ISBN 80-214-0363-2.
- [7] FADEEV Y. P. *KLT-40S Reactor plant for floating CNNP FPU*. International atomic energy agency [online]. IAEA. 2011, [cit 2015-04-24]. Dostupné z: <http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloads/Technology/meetings/2011-Jul-4-8-ANRT-WS/2_KLT-40S_VBER_OKBM_Afrikantov_Fadeev.pdf>
- [8] FEDERAL UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL (UFRGS). *Description of the FBNR Reactor: Detailed description*. Fixed bed nuclear reactor [online]. 2015 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://www.sefidvash.net/fbnr/htms/description_of_the_fbnr_reactor_detailed.htm>
- [9] IAEA. *Advances in small modular reactor technology developments*. International atomic energy agency [online]. IAEA, September 2014, [cit 2015-04-24]. Dostupné z: <http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/SMR/files/IAEA_SMR_Booklet_2014.pdf>
- [10] IAEA. *SMR's under construction for immediate deployment - the front runners...* International atomic energy agency [online]. IAEA, 2013, [cit 2015-04-24]. Dostupné z: <http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/SMR/files/5_SMRs_under_construction.pdf>

- [11] IAEA. *Status of small and medium sized reactor design*. International atomic energy agency [online]. IAEA, September 2012, [cit 2015-04-24]. Dostupné z: <<https://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/SMR/files/smr-status-sep-2012.pdf>>
- [12] SKLENKA, L'ubomír. *Malé a modulární jaderné reaktory a jejich potenciální využití v České Republice* [online]. Praha, 2014, [cit 2015-04-24]. Dostupné z: <http://www.fjfi.cvut.cz/materialyVR/2014-01-30/Sklenka/Habilitacni_prednaska_L_Sklenka.pdf> Habilitační přednáška. ČVUT.
- [13] SLÁMA, Václav. *Malé modulární jaderné reaktory* [online]. Plzeň, 2012, [cit 2015-04-24]. Dostupné z: <[http://old.fst.zcu.cz/_files_web_FST/_SP_FST\(SVOC\)/_2012/_sbornik/PapersPdf/Mgr/Slama_V.pdf](http://old.fst.zcu.cz/_files_web_FST/_SP_FST(SVOC)/_2012/_sbornik/PapersPdf/Mgr/Slama_V.pdf)> Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [14] SPIRAX-SARCO LIMITED. *Calculators*. Spirax sarco [online]. 2015, [cit 2015-04-24]. Dostupné z: <http://www2.spiraxsarco.com/esc/SS_Properties.aspx>
- [15] UNIVERSITY OF WISCONSIN BOARD OF REGENTS . *Fluid property calculator*. IRC [online]. 2015, [cit 2015-04-24]. Dostupné z: <<https://www.irc.wisc.edu/properties/>>
- [16] UX CONSULTING COMPANY. *Design & Vendors: SMR profiles*. UxC SMR Research Center [online]. 2015, [cit 2015-04-24]. Dostupné z: <http://www.uxc.com/smr/uxc_SMRDetail.aspx>
- [17] UX CONSULTING COMPANY. *Design & Vendors: SMR's at preliminary stage*. UxC SMR Research Center [online]. 2015, [cit 2015-04-24]. Dostupné z: <http://www.uxc.com/smr/uxc_SMRDetail.aspx>
- [18] VESECKÝ, Robert. *Jaderné reaktory IV. generace* [online]. Praha, 2006, [cit 2015-04-24]. Dostupné z: <<http://veacky.wz.cz/work/Diplomka.pdf>> Diplomová práce. ČVUT.
- [19] WISCHNEWSKI, Berndt. Some scientific and engineering data online: *Water, saturated steam and overheated steam*. Peace software [online]. 2015, [cit 2015-04-24]. Dostupné z: <http://www.peacesoftware.de/einigewerte/wasser_dampf_e.html>

- [20] WORLD ENERGY COUNCIL. Data. *World Energy council* [online]. 2015, [cit 2015-04-24]. Dostupné z: <<http://www.worldenergy.org>>
- [21] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *Information library: Small nuclear power reactors*. World Nuclear Association [online]. 2015, [cit 2015-04-24]. Dostupné z: <<http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Power-Reactors/Small-Nuclear-Power-Reactors/>>